

SÉRIE A, N° 308

N° D'ORDRE:

332

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

MAURICE LEBRUN

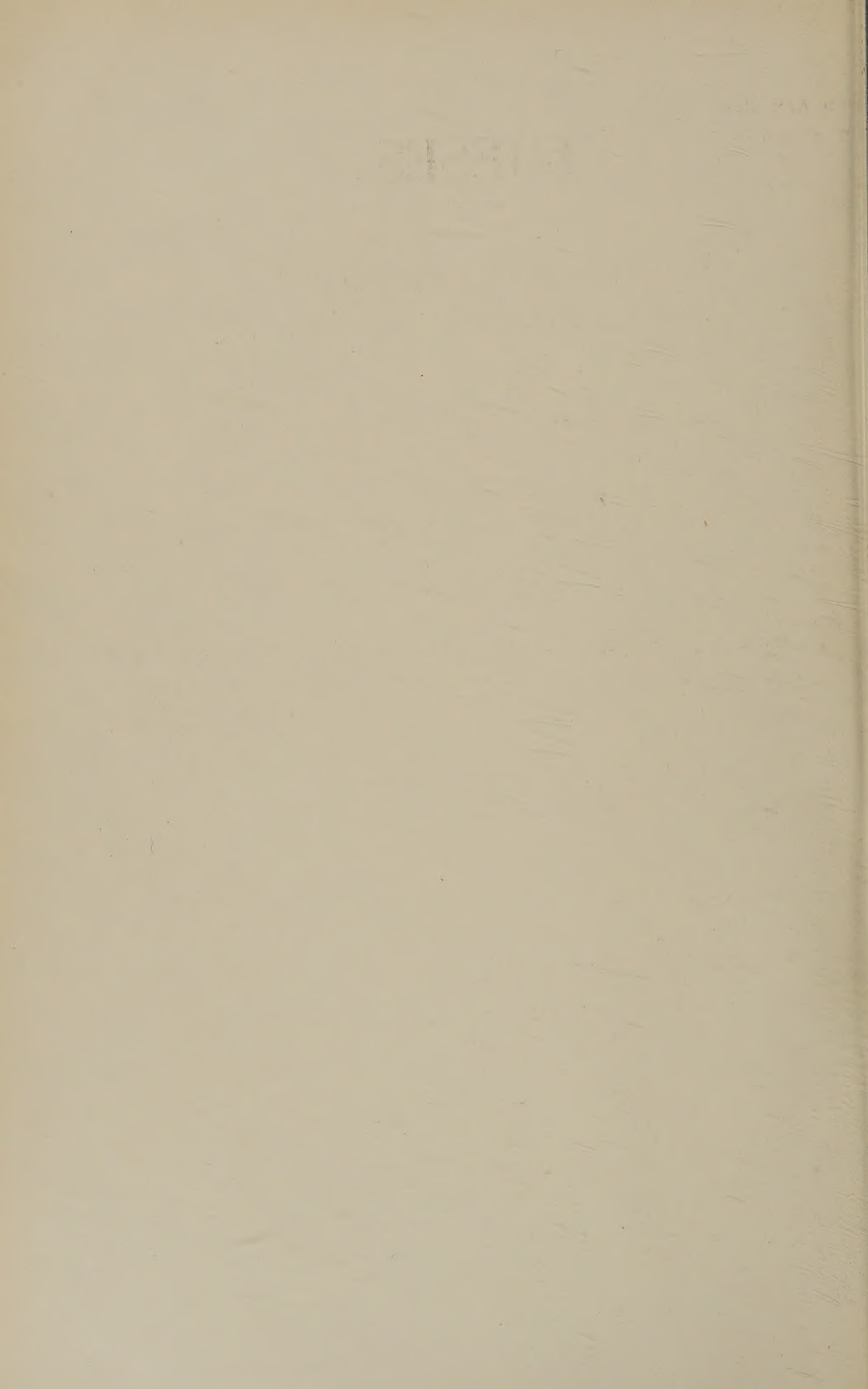
1^{re} THÈSE. — CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES
SOUDURES AUTOGÈNES SUR ACIER A FAIBLE
TENEUR EN CARBONE ET DU MÉTAL SOUDÉ
AU VOISINAGE DE LA SOUDURE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **9 AVRIL 1935** devant la Commission d'examen

M. BEGHIN..... *Président.*

MM. GUICHARD
VILLEY } *Examineurs.*



THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

MAURICE LEBRUN

1^{re} THÈSE. — CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES
SOUDURES AUTOGÈNES SUR ACIER A FAIBLE
TENEUR EN CARBONE ET DU MÉTAL SOUDÉ
AU VOISINAGE DE LA SOUDURE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

devant la Commission d'examen

M. BEGHIN..... *Président.*

MM. GUICHARD
VILLEY } *Examineurs.*

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire M. Molliard.
Doyen. C. Maurain, professeur. — Physique du Globe.

Professeurs honoraires	H. le Chatelier.	Léon Brillouin.	Auger.
	R. Lebesgue.	Goursat.	Blaise.
	A. Fernbach.	Wallerant.	Dangeard.
	A. Leduc.	Guillet.	Janet.
	Emile Picard.	Péchar.	Lespieau.
	Rémy Perrier.	Freundler.	Marchis.
			Mouton.

PROFESSEURS

G. Bertrand... T Chimie biologique.
M. Caullery... T Zoologie (Evolution des êtres organisés).
G. Urbain..... T Chimie générale.
Emile Borel... T Calcul des probabilités et Physique mathématique.
Jean Perrin... T Chimie physique.
H. Abraham... T Physique.
E. Cartan..... T Géométrie supérieure.
M. Molliard... T Physiologie végétale.
L. Lapique... T Physiologie générale.
E. Vessiot.... T Mécanique analytique et Mécanique céleste.
A. Cotton..... T Recherches physiques.
J. Drach..... T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
Charles Fabry. T Enseignem. de Physique.
Charles Pérez. T Zoologie.
Léon Bertrand. T Géologie structurale et géologie appliquée.
P. Portier.... T Physiologie comparée.
E. Rabaud.... T Biologie expérimentale.
M. Guichard... T Chimie minérale.
Paul Montel... T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.
P. Wintrebert. T Anatomie et histologie comparées.
L. Blaringhem. T Botanique.
O. Duboseq... T Biologie maritime.
G. Julia..... T Application de l'analyse à la Géométrie.
C. Mauguin... T Minéralogie.
A. Michel-Lévy. Pétrographie.
H. Bénard.... T Mécanique expérimentale des fluides.
A. Denjoy.... T Calcul différentiel et calcul intégral.
L. Lutaud.... T Géographie physique et géologie dynamique.
Eugène Bloch.. T Physique théorique et physique céleste.
G. Bruhat.... Physique.
E. Darmois... Physique.
A. Debierne... Radioactivité.

A. Dufour.... T Physique (P.C.B.).
L. Dunoyer... Optique appliquée.
A. Guilliermond T Botanique (P.C.B.).
M. Javillier... Chimie biologique.
L. Joleard.... Paléontologie.
Robert-Lévy... Zoologie.
F. Picard..... Zoologie (Evolution des êtres organisés).
Henri Villat... T Mécanique des fluides applications.
Ch. Jacob.... T Géologie.
P. Pascal.... T Chimie minérale.
M. Fréchet.... T Calcul des Probabilités Physique mathématique.
E. Esclanong.. T Astronomie.
M^{me} Ramart-Lucas. T Chimie organique.
H. Béghin.... T Mécanique physique expérimentale.
Foch Mécanique expérimentale des fluides.
Pauthenier... Physique (P.C.B.).
De Broglie ... T Théories physiques.
Chrétien..... Optique appliquée.
P. Job Chimie générale.
Labrousse.... Physique du Globe.
Prenant..... Zoologie.
Villey Mécanique physique et expérimentale.
Bohn Zoologie (P.C.B.).
Combes Botanique.
Garnier. Calcul différentiel.
Pérès. Mécanique des fluides.
Hackspill.... Chimie (P.C.B.).
Laugier Physiologie générale.
Toussaint... Technique aéronautique.
M. Curie Physique (P.C.B.).
G. Ribaud ... T Hautes températures.
Chazy T Mécanique rationnelle.
Gault. Chimie (P.C.B.).
Croze. Physique.
Dupont Théories chimiques.
Lanquaine ... Géologie.
Valiron Mathématiques générales.

Secrétaire. A. Faud
Secrétaire honoraire D. Tombeck.



INTRODUCTION

La théorie et la pratique ont une part égale dans la mise au point de la soudure autogène des métaux, telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Les équipes de soudeurs formés par André LE CHATELIER et par Oscar KJELLBERG ont justifié, par leur habileté, l'optimisme de ces deux savants ingénieurs. Leurs réalisations ont facilité la tâche d'Irving LANGMUIR.

Chimistes, métallographes, électriciens, sont venus leur apporter leur concours, mais l'honneur d'avoir soutenu les premières luttes, d'avoir usé du laboratoire à bon escient, d'avoir créé les premiers appareils d'utilisation leur revient tout entier.

Formé à leur école, nous avons suivi leur effort pendant plus de vingt ans. Morts, ils nous ont laissé le flambeau. Comme eux, nous avons toujours considéré qu'il n'est pas nécessaire d'espérer pour entreprendre ni de réussir pour persévérer.

Nous avons voulu marquer une étape dans l'incessante évolution des procédés d'assemblage des métaux par fusion qu'ils avaient créés.

Désireux de nous libérer de certaines contingences dans la rédaction des notes qui vont suivre, nous avons cherché un guide à l'esprit à la fois scientifique et réalisateur. Nous avons eu l'honneur et la chance de le trouver en la personne de M. le Professeur BEGHIN, titulaire de la chaire de mécanique physique à la Sorbonne.

Nous lui exprimons notre très vive reconnaissance pour les conseils qu'il a bien voulu nous donner.

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITION

La soudure autogène des métaux consiste à les assembler par fusion, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un métal d'apport. Peu importe comment cette fusion est produite.

Cette définition est suffisante. Dès que l'on veut la compléter, on risque de tomber dans un cas particulier.

On peut employer indifféremment, tout au moins pour la soudure de l'acier à faible teneur en carbone, la forge, la soudure au chalumeau oxhydrique ou oxyacétylénique, la soudure électrique à l'arc et la soudure à l'hydrogène atomique.

Nous ne nous occuperons pas de la soudure à la forge qui comporte, à côté de beaucoup d'avantages, trop d'inconnues, ni de la soudure oxhydrique qui n'offre qu'un intérêt rétrospectif.

Les autres procédés d'assemblage des métaux présentent cette caractéristique commune de ne donner une soudure autogène qui si l'on veut bien s'en tenir à la signification générale de ce terme.

Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques de la partie soudée et de ses abords ne sont jamais tout à fait identiques à celles du métal primitif.

Le fait que nous envisagerons seulement la soudure de l'acier à faible teneur en carbone, nous dispensera de nous préoccuper des phénomènes de trempe.

Le problème est simplifié, mais reste néanmoins complexe par l'étendue des mesures qu'il nécessite si l'on veut l'étudier convenablement.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que le développement des applications de la soudure autogène, particulièrement en construction navale, a conduit les aciéries à produire des

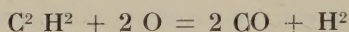
métaux à caractéristiques mécaniques élevées, dans lesquels la teneur en carbone reste aux environs de 0,20 %.

L'objet de ce travail est de rechercher, au moyen d'essais appropriés, l'influence des différents systèmes de soudure que nous venons d'énumérer, d'abord sur la soudure elle-même, puis sur le métal soudé.

Nous commencerons par les décrire en évitant toutefois de rappeler ce que l'on peut trouver facilement dans une littérature assez abondante, mais d'allure plus technologique que scientifique, sauf en ce qui concerne le métal déposé par soudure électrique à l'arc. La réaction de la soudure sur le métal voisin n'a fait l'objet, à notre connaissance, d'aucune étude précise.

Soudure oxyacétylénique

La soudure oxyacétylénique se réalise au moyen d'un chalumeau permettant la combustion d'un mélange d'acétylène et d'oxygène suivant la formule



indiquée en 1895 par M. Henry LE CHATELIER comme devant permettre d'obtenir une très haute température, les gaz de la combustion ayant en même temps des propriétés réductrices.

L'hydrogène et l'oxyde de carbone brûlent ensuite en empruntant l'oxygène nécessaire à l'air ambiant, pour fournir comme produit de la combustion, de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique.

Le premier appareil fut construit en mars 1901 par M. PICARD. Il consistait en un cylindre de matières réfractaires perforé d'un trou cylindrique (fig. 1). L'un des gaz arrivait dans l'axe du cylindre et l'autre perpendiculairement à cet axe.

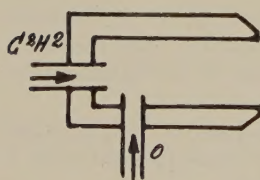


Fig. 1

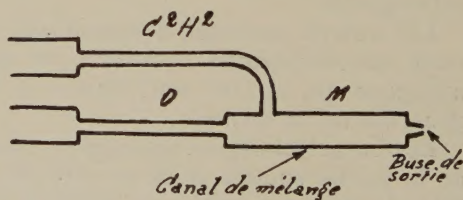


Fig. 2

L'oxygène était préparé au moyen de chlorate de potasse. L'acétylène provenait d'un tube dans lequel il avait été dissous et comprimé dans l'acétone suivant les procédés de MM. CLAUDE et HESSE. Ce gaz, dégagé sous pression, était amené dans le centre de l'appareil de façon à entraîner l'oxygène qui, lui, était à très faible pression.

On obtenait la fusion du fer, mais avec une oxydation considérable, un bruit intense et de fortes détonations.

Après divers tâtonnements ayant pour but de diluer l'acétylène pour rendre la combustion moins vive, M. PICARD, continuant ses essais, s'appliqua à réaliser un chalumeau dans lequel la vitesse de sortie des gaz devienne supérieure à la vitesse de propagation de la flamme. Il lui fallait atteindre au moins 200 mètres par seconde. Cette vitesse énorme de combustion permet d'obtenir, comme l'a indiqué M. Henry LE CHATELIER, des flammes d'un volume très petit dans lesquelles la concentration de chaleur par unité de volume dépasse tout ce que l'on aurait pu prévoir et n'est égalée que par l'arc électrique ou l'hydrogène atomique. Il y parvint en août 1901, avec l'appareil représenté sur la figure 2.

Les premiers chalumeaux industriels apparurent en 1902 (figure 3).

A ce moment-là, M. D'ARSONVAL signala la possibilité d'emploi d'acétylène à basse pression et d'oxygène à pression élevée. FOUCHÉ résolut ce problème en 1903.

L'oxygène comprimé était alors obtenu industriellement par électrolyse, mais les premières machines de CLAUDE allaient bientôt permettre sa production à bas prix.

L'invention de FOUCHÉ, complétée par la création d'une soupape hydraulique destinée à protéger les générateurs d'acétylène contre un retour éventuel d'oxygène, est à la base du développement de la soudure autogène.

L'acétylène à basse pression est généralement moins pur que l'acétylène dissous. Il contient souvent des traces d'hydrogène sulfuré et d'hydrogène phosphoré qui réagissent sur les soudures.

Les chalumeaux à acétylène dissous consomment exactement les mêmes volumes d'acétylène et d'oxygène. Les chalumeaux du type FOUCHÉ consomment 1,2 à 1,4 d'oxygène pour 1 d'acétylène.

Dans les deux cas l'oxygène complémentaire nécessaire à la combustion intégrale de l'acétylène est emprunté à l'air ambiant.

La température de la flamme oxyacétylénique est de l'ordre de 3000°. La figure 4 montre comment la combustion se réalise.

Cette température est assez éle-

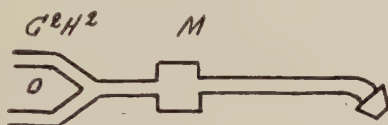


Fig. 3

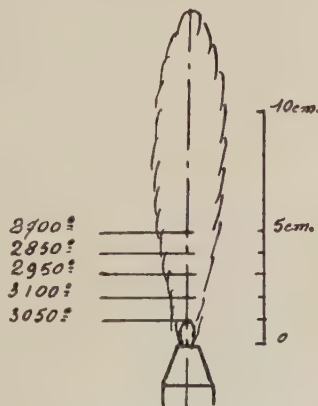


Fig. 4

vée pour faire disparaître, au moins partiellement, certains éléments essentiels du métal d'apport au cours de la fusion et par suite, pour diminuer ses caractéristiques mécaniques.

La puissance d'un chalumeau se mesure par le nombre de litres d'acétylène qu'il peut brûler à l'heure. On recommande pour la soudure des tôles un débit de 100 litres d'acétylène à l'heure par millimètre d'épaisseur.

Les premiers travaux de soudure sur des tôles à faible teneur en carbone ont été réalisés par André LE CHATELIER, Ingénieur en Chef de la Marine, à Toulon.

En 1903, une circulaire du Ministre de la Marine autorisait l'emploi de la soudure oxyacétylénique pour tous les travaux où la résistance de la pièce n'était pas en cause.

Le 28 décembre 1905, une nouvelle circulaire étendait l'emploi de la soudure :

1° au cas où la pièce à souder est soumise à des efforts assez sérieux, mais où sa rupture n'entraîne pas une avarie grave.

2° au cas où la résistance de la pièce est susceptible d'être contrôlée par un effort artificiel égal à une fois et demie l'effort réel et de même nature (traction, flexion, charge hydraulique).

Soudure électrique à l'arc

La soudure électrique à l'arc est antérieure à la soudure oxyacétylénique.

Elle se pratiquait d'abord au moyen d'un crayon de charbon relié au pôle positif d'une dynamo, le pôle négatif étant relié à la pièce à souder. La chaleur de l'arc permettait de fondre des riblons qui servaient de métal d'apport.

Le remplacement du crayon de charbon par une tige de fer constituant en même temps le métal de soudure réalisa un progrès, sans cependant donner une solution du problème, comparable par ses résultats à ceux que l'on devait obtenir plus tard avec la soudure oxyacétylénique.

Il fallut attendre jusqu'en 1908, époque où le Suédois Oscar KJELLBERG eut l'idée d'enduire l'électrode métallique de matières destinées à guider l'arc qui, avec l'électrode nue, était essentiellement erratique. Son point d'impact tournait sans loi définie sur la pièce à souder.

Le but poursuivi par KJELLBERG était de pouvoir souder facilement au-dessus de la tête pour réparer des chaudières marines. Accessoirement, il envisageait l'amélioration du métal, conformément à la phrase suivante, extraite de son premier brevet :

« Eventuellement, on peut ajouter à la matière de l'enveloppe des matières, qui, en formant des alliages avec le métal de soudure, influent sur les propriétés mécaniques et chimiques de la soudure et lui donnent un degré de sûreté convenable. »

Malgré son imprécision, ce texte allait être le point de départ de travaux féconds en résultats, d'abord en Suède, en France et en Angleterre, puis dans presque tous les pays industriels du monde.

KJELLBERG avait complété et précisé sa pensée dans un deuxième brevet, pris en 1912, dans lequel il donnait la liste et la proportion de produits qui lui paraissaient susceptibles d'améliorer le métal fondu. Ils constituaient de plus une gaine légèrement poreuse et cassante, de manière à ce qu'elle se détachât en cours de soudure.

Il indiquait, chose essentielle, que la gaine devait fournir un fondant destiné à protéger le métal fondu.

Il arrivait ainsi à la conception d'une opération métallurgique comparable à celle du four Martin ou du four électrique, et c'est de cette conception que sont nés les progrès qui ont suivi.

Comment cette opération se définit-elle?

Le four électrique est un appareil dans lequel on peut faire agir un laitier sur un bain de fusion dans une atmosphère non oxydante. L'emploi d'une scorie très calcaire et légèrement carburée permet de réduire l'oxyde de fer du métal fondu. Cette scorie est en même temps un agent de désulfuration.

Dans le four Martin basique, on peut former avec des oxydes de fer et de la chaux une scorie fluide par laquelle on élimine le phosphore.

Dans le four Martin acide, la scorie riche en silice forme un protecteur efficace du métal fondu. La réduction du carbone est moindre que dans le four basique.

Il eût été très simple de chercher des formules d'enrobage dans la composition des scories métallurgiques, qui est à peu près la suivante :

Four Martin acide		Four Martin basique	
Si 0	51,3	21,2	
Al 2 0 ³	0,6	2,5	
Fe 0	27,6	15,0	
Mn 0	19,6	13,6	
Ca 0	0,3	36,7	
Mg 0	1,6	10,4	
P2 0 ³	0,014	0,35	
S	0,04	0,12	

On n'y songea pas immédiatement. Cependant on arriva quand même à l'idée qu'un enrobage devait contenir de la chaux et de la silice. On y ajouta plus tard de l'oxyde de fer.

Un tel enrobage empêchait l'oxydation par l'action de la silice qui donnait à la scorie recouvrant la soudure la fluidité et la compacité nécessaires. De plus, la silice fondue, qui est seulement perméable à l'hydrogène et à l'hélium

empêchait tout contact avec l'air ambiant. Cet enrobage favorisait la déphosphoration et la désulfuration par la présence de la chaux et de l'oxyde de fer.

Il est intéressant de reproduire les résultats qu'il a permis d'obtenir lors de la première présentation des électrodes de KJELLBERG devant le Lloyd's Register of Shipping.

	Tôle	Electrode	Métal fondu
C	0,25	0,16	0,05
Mn	0,46	0,56	0,18
P	0,043	0,032	0,031
S	0,031	0,024	0,026
Si	0,052	0,006	0,011

Le carbone avait presque disparu et le manganèse avait diminué des 2/3.

Ces résultats, bien que relativement satisfaisants, montraient dans quel sens il fallait agir sur l'enrobage pour reconstituer un métal fondu analogue à l'acier doux.

On devait augmenter la teneur en carbone et en manganèse.

Il fallait toutefois tenir compte de l'affinité de l'oxyde de fer et de la silice pour le manganèse. De plus, la scorie devait rester suffisamment protectrice du métal fondu sans adhérer trop fortement à ce métal, sous peine d'augmenter la main-d'œuvre pour son enlèvement.

Les travaux de STROHMENGER, de JONES, de BRILLIÉ sont venus compléter ceux de KJELLBERG pour la recherche de la solution convenable.

Dans une autre voie, on chercha la protection du métal fondu et son amélioration par la production d'une atmosphère réductrice autour de l'électrode.

Des enrobages à base de cellulose, qui dégageaient de l'hydrogène en brûlant, apparurent aux Etats-Unis, qui s'étaient montrés jusque-là résolument hostiles à toute idée de progrès en soudure à l'arc par leur entêtement à vouloir se servir des électrodes nues.

Le même entêtement a d'ailleurs causé de graves mécomptes aux Allemands, dans la construction du cuirassé « *Deutschland* ».

Il nous reste à définir la nature du courant propre à la soudure à l'arc et ses caractéristiques en fonction du diamètre des électrodes.

Quand KJELLBERG a fait ses premières expériences et même quand nous avons commencé à travailler avec lui, en 1913, le courant continu était seul en usage.

Il permettait l'allumage d'un arc avec des électrodes nues ou avec des électrodes enrobées d'une façon quelconque.

Le courant alternatif ayant peu à peu remplacé le courant continu, on a essayé de l'employer en soudure. Nos

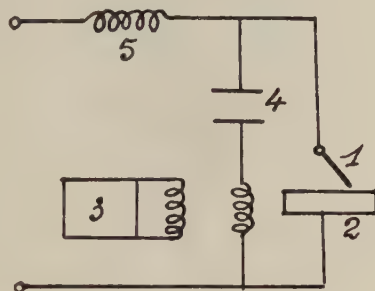
premiers essais sur ce point avec des enrobages type KJELLBERG, remontent à 1915. Nous avons alors constaté les faits suivants :

1° On ne pouvait pas allumer un arc en courant alternatif avec une électrode nue, à moins de disposer d'une tension de l'ordre de 200 volts, avec les transformateurs ordinaires. La tension aux bornes de l'arc étant seulement de 18 à 20 volts, le rendement était déplorable.

(On a remédié à cet inconvénient en superposant au circuit de soudure un second circuit oscillant de très haute fréquence.

FIG. 4 bis

1. Electrode,
2. Pièce à souder,
3. Transformateur Tesla,
4. Condensateur,
5. Bobine de choc destinée à empêcher toute dérivation du courant de haute fréquence à travers la source du courant de basse fréquence.



Ce dispositif n'a d'ailleurs été trouvé qu'en 1926, époque à laquelle l'emploi des électrodes nues était complètement abandonné en France).

2° Les électrodes enrobées s'allumaient bien en courant alternatif à basse tension (60 à 80 volts) à la condition que l'enrobage contienne des traces de soude ou de potasse, la potasse étant supérieure à la soude comme facilité d'emploi.

Sans soude ni potasse, la tension d'allumage s'élevait à 115 volts.

3° Les qualités mécaniques des soudures étaient les mêmes quel que soit le type de courant employé, sous la seule réserve que les appareils d'utilisation du courant alternatif aient un certain coefficient de self-induction.

Pour ce qui concerne l'intensité à appliquer aux électrodes, KJELLBERG l'avait déterminée pratiquement pour les électrodes de 5 mm. de diamètre, les seules dont il se servit.

L'application que nous eûmes à faire de la soudure à l'arc pour les besoins de la défense nationale, nous conduisit à l'emploi d'électrodes d'autres diamètres.

Nous avons alors proposé, pour déterminer le débit le plus convenable, la formule suivante :

$$I = (K - \frac{D}{10}) (D^2 + 4 D)$$

dans laquelle I était le débit en ampères, K un coefficient variant avec la nature du métal de l'électrode (pour l'acier

à faible teneur en carbone $K = 4,1$) et D le diamètre de l'électrode. Les facteurs D^2 et $4 D$ tenaient compte de la section droite de l'électrode et de sa surface de refroidissement.

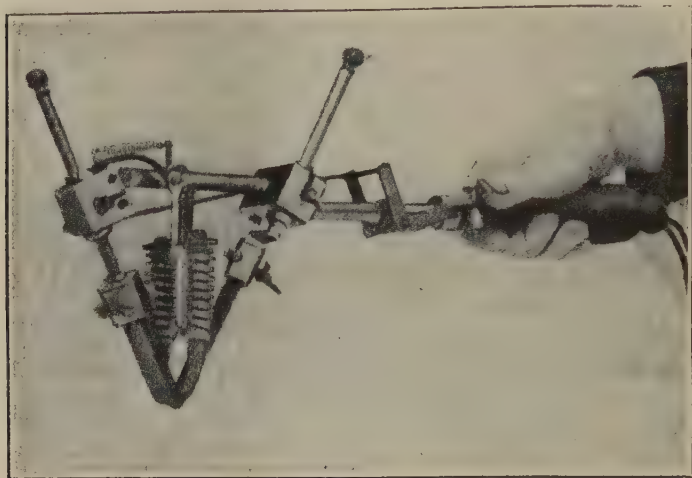


Fig. 5

Les progrès réalisés par la suite dans les enrobages, et notamment l'augmentation de leur épaisseur qui en résulta, nous amenèrent à introduire un facteur tenant compte de cette épaisseur, et notre formule est maintenant :

$$I = \left(K + \frac{e}{2} \frac{D}{10} \right) (D^2 + 4 D)$$

dans laquelle e est l'épaisseur de l'enrobage.

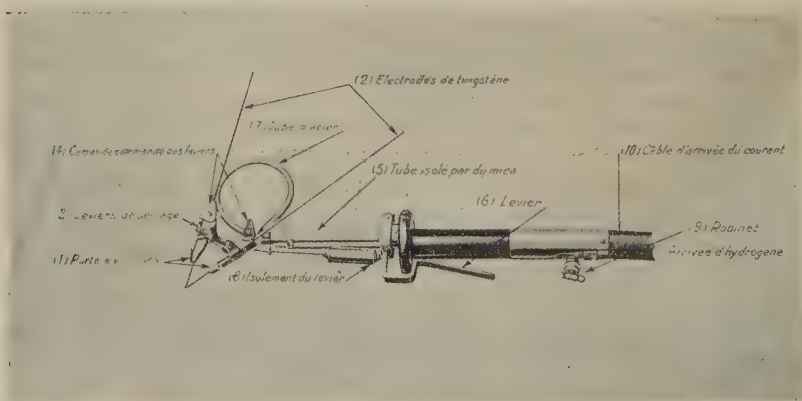


Fig. 6

La tension aux bornes de l'arc est déterminée d'abord par le métal de l'électrode et par la longueur de l'arc.

L'acier à faible teneur en carbone a une tension à l'arc de 18 volts pour une longueur d'arc de 3 mm. Cette tension augmente avec la nature de l'enrobage, dont les particules non conductrices restent en suspension dans la flamme et augmentent sa résistivité.

Dans l'hydrogène pur, la tension d'un arc de 3 mm. de longueur s'élève à 60 volts. Avec les électrodes à enrobage cellulosique, cette tension varie de 30 à 40 volts.

La description des appareils employés pour la soudure sortirait du cadre de cette étude. Signalons simplement la nécessité de protéger les yeux et le visage des soudeurs contre les rayons ultra-violets et infra-rouges par des verres appropriés.

Soudure à l'hydrogène atomique

La possibilité de réaliser des soudures en employant à la fois un arc électrique et un jet d'hydrogène, qui est la définition même de la soudure à l'hydrogène atomique, avait été indiquée par ZERENER en 1899. Il n'avait cependant eu aucune idée de la transformation qui pouvait se produire dans l'hydrogène sous l'influence de l'arc.

Il est curieux de constater une certaine similitude de forme entre l'appareil qu'il avait réalisé et la première torche de LANGMUIR (figures 5 et 6) auquel revient l'honneur d'avoir précisé en 1926 les conditions de transformation de l'hydrogène dans un arc électrique.

ZERENER employait deux crayons de charbon inclinés et LANGMUIR deux électrodes de tungstène ayant la même inclinaison.

La découverte de LANGMUIR résulte de ses travaux sur différents gaz placés dans des ampoules électriques à filament de tungstène.

Il avait constaté que lorsque l'on chauffe un filament de tungstène dans le vide au moyen de courant électrique, la chaleur qui est dissipée par rayonnement augmente proportionnellement à la puissance 4,7 de la température absolue.

Si l'on introduit dans l'ampoule un gaz inerte, tel que de l'azote ou de l'argon, une certaine quantité de chaleur est éliminée par conductibilité et par convection.

Cette perte d'énergie se mesure en retranchant de l'énergie totale l'énergie rayonnée mesurée précédemment.

On trouve ainsi que la perte de chaleur par conductibilité et par convection varie en raison de la puissance 1,9 de la température, même jusqu'à des températures atteignant le point de fusion du tungstène (3.660-3.687° C).

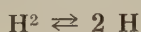
Si l'ampoule est remplie d'hydrogène, le phénomène prend une autre allure.

La perte de chaleur par conductibilité et par convection varie en raison de la puissance 1,9 de la température jusqu'à 1.700° absolus. Elle augmente ensuite très rapidement.

Entre 2.600° et 3.400° absolus, la chaleur transportée par l'hydrogène augmente suivant la puissance 5 de la température.

Sous une pression de 50 mm., elle augmente suivant la puissance 6.

Cette anomalie a amené Irving LANGMUIR à dire qu'à haute température, les molécules d'hydrogène étaient dissociées suivant la formule



La spectographie a permis de vérifier cette hypothèse.

On a constaté, en outre, que des oxydes métalliques Cu O, Fe² O³ ou Zn O, placés dans une ampoule contenant de l'hydrogène atomique et reliée à une autre ampoule dans laquelle se trouvait un filament de tungstène chauffé à 1.500°, se trouvaient rapidement réduits à l'état métallique.

L'hydrogène atomique peut donc réagir à la température ambiante sur certains oxydes métalliques, ce qui ne se produit pas avec l'hydrogène moléculaire.

Enfin, l'hydrogène atomique a la propriété de se dissoudre dans le platine à la température ambiante en augmentant sa résistivité. Si l'on remet le platine ainsi traité en contact avec l'oxygène, la résistivité reprend sa valeur normale.

Il nous paraît nécessaire d'ouvrir ici une parenthèse et de rappeler les travaux de ceux qui ont précédé LANGMUIR. Ils ont soupçonné la présence d'une forme particulière de l'hydrogène, très différente de l'hydrogène moléculaire, mais sans penser jamais à la dissociation de la molécule.

En 1853, OSANN avait constaté que si l'on réalise l'électrolyse de l'eau avec une électrode de palladium au pôle négatif, l'hydrogène s'incorpore aussitôt au palladium. Il avait alors conclu à une modification de l'hydrogène analogue à l'ozone O³. Il avait également montré que l'hydrogène change de forme au contact du platine très divisé.

GRAHAM, reprenant ses expériences, avait trouvé que l'hydrogène oclus dans le palladium réduisait les sels ferreux à l'état de sels ferreux.

Enfin, il avait prouvé que l'hydrogène, dont les affinités à l'état ordinaire sont si peu prononcées, devient au contraire très actif au moment où il est mis en liberté.

Il se porte alors sur un grand nombre de corps pour leur enlever de l'oxygène et les amener ainsi à un état inférieur d'oxydation.

GRAHAM avait démontré que le palladium, qui est amagnétique, devenait magnétique quand il est traité par l'hydrogène. Ceci a cependant été contesté par BLONDLOT.

Beaucoup plus tard, certains chimistes pensèrent que l'hydrogène possède, au moment où il se dégage, une activité plus grande parce qu'il serait encore, partiellement, à l'état d'atomes libres. C'est probablement la vérité, mais il n'en reste pas moins que le fait d'avoir découvert et mis en évidence la présence de l'hydrogène atomique est exclusivement l'œuvre de LANGMUIR.

Après avoir étudié l'hydrogène dans une ampoule traversée par un fil de tungstène, il étudia les arcs dans l'hydrogène à la pression atmosphérique.

Ces arcs sont caractérisés par une chute de tension élevée et par la formation d'un papillon violacé assez semblable à la flamme d'un bec à acétylène. Ce papillon est composé entièrement d'hydrogène atomique. Des atomes libres existent encore dans le panache qui l'entoure (figure 7).

La production d'hydrogène atomique est démontrée à la fois par l'analyse spectrale et par le fait que la chaleur de l'arc trans-

mise par convection et par conductibilité serait impuissante à produire les températures que l'on observe à l'extrémité du papillon.

L'hydrogène atomique est employé à la soudure des métaux.

Les premières torches de LANGMUIR ont été perfectionnées en France par M. BRILLIÉ, qui a employé des électrodes parallèles et qui a réalisé une torche triphasée comportant trois papillons équidistants. Cette dernière torche emploie des électrodes de tungstène de 3 mm. de diamètre. Elle peut souder deux tôles de 15 mm. d'épaisseur, placées bord à bord sans chanfrein.

L'énergie mise en œuvre correspond au moins à celle d'une électrode en acier doux de 10 mm. de diamètre.

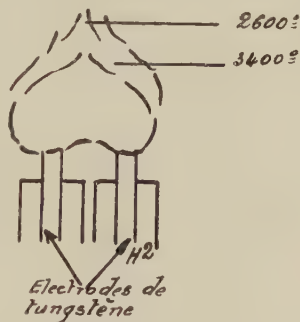


Fig. 7

CHAPITRE II

ESSAIS

Les essais que nous nous proposons d'effectuer pour déterminer les caractéristiques mécaniques des soudures autogènes sur aciers à faible teneur en carbone et sur le métal soudé au voisinage de la soudure sont les suivants :

Mesure de la résistance à la traction R.

Mesure de la limite apparente d'élasticité E.

Mesure de l'allongement A %.

Mesure de la résilience ρ .

Mesure de la striction Σ , chaque fois que ce renseignement pourra nous être utile.

Nous procéderons aussi à quelques essais microscopiques pour compléter et vérifier les résultats donnés par certains essais mécaniques.

L'usage est de tolérer certains écarts dans les opérations courantes de réception des produits métallurgiques parce que l'on suppose que les métaux ont des origines différentes et que plusieurs laboratoires d'essais peuvent présenter des divergences, tant dans le coefficient personnel d'appréciation de chaque opérateur, que dans le matériel d'essai lui-même.

Ces écarts sont les suivants pour les nuances d'acier qui nous intéressent; ce sont en réalité des constatations expé-

rimentales qui peuvent servir de base pour la réception d'un lot d'acier.

Mesure de la résistance à la traction R

Moyenne de 325 essais.....	34,42	41,52
	31	41,3
	35,1	44
	35,7	40
	34,7	41,2
	36,2	41,3
Ecart ^s relevés	31	43,4
	36,31	39,7
	34,6	41
	36,2	40,1
	33,4	43,2

Mesure de la limite apparente d'élasticité E

Moyenne de 263 essais... ..	29,83	34,18
	30,1	33,7
	31,3	34
	30,9	33,4
	27,4	35,4
Ecart ^s relevés	32,8	36,7
	31,3	34,6
	30,9	33
	28,7	33,5
	25,1	33,4

Mesures des allongements $A \% L = \sqrt{66,67 S} (1)$

Moyenne de 315 essais.....	14,69	22,71
	15,4	24,1
	14,5	21
	14,5	22,5
	14,5	22,5
	14	23
Ecart ^s relevés	15	22,15
	14	22
	15	24,5
	15,5	22,5
	14,5	

(1) Cette formule, qui est celle de la commission française de standardisation, définit la distance des repères servant à mesurer l'allongement en fonction de la section de l'éprouvette.

Mesure de la résistance ρ Barreau Mesnager

Moyenne de 105 essais.....	1,445	6,439	9,476
	1,4	6,7	8,9
	2,1	6,517	8,051
	1,079	6	8,6
	1,5	6,5	8,5
Moyenne des écarts.....	1,9	6,863	10,457
	1,558	6,5	10,8
	1,55	6,35	9,1
	1	6,271	8,6
	1,125	7,25	8,76

(AFNOR. — Cahier des charges unifié français, produits sidérurgiques).

Les plus grandes divergences se relèvent dans les faibles résiliences qui donnent des résultats particulièrement erratiques.

Mesure de la résistance à la traction R

Nous avons été frappés par certaines divergences dans les résultats d'essais de traction effectués en 1920 sur des échantillons d'acier apparemment semblables, mais d'épaisseurs différentes.

Il s'agissait d'expériences faites au laboratoire de Greenwich (Angleterre) pour le compte du Lloyd's Register of Shipping, afin de savoir si certaines électrodes métalliques pouvaient être adoptées, pour la construction et la réparation des navires, par ce registre de classification.

La résistance des tôles non soudées variait avec leur épaisseur, comme l'indique la figure 8.

La largeur des éprouvettes d'essai allait de 49,5 mm. à 51 mm. et leur épaisseur de 7,42 mm. à 24,5 mm.

Nous avons alors attribué ces divergences, soit à l'influence des recuits et des laminages successifs du métal, soit à des variations légères de sa composition.

Les mêmes phénomènes s'étant reproduits en 1933, au cours d'essais effectués dans les mêmes conditions, et toujours pour le Lloyd's Register, mais au laboratoire de Gothembourg (Suède), nous avons cherché si des éprouvettes soudées, de mêmes dimensions, cassées dans la soudure par traction (figure 9) donnaient la même allure sinusoïdale des résistances.

Nous avons trouvé des chiffres analogues que nous avons reportés sur la figure 8.

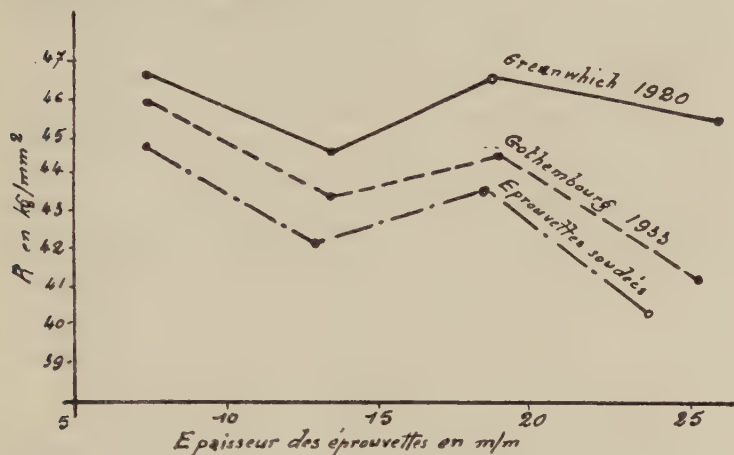


Fig. 8

Par conséquent, l'élaboration des tôles ne pouvait être mise en cause. Un seul facteur pouvait intervenir : la dimension des éprouvettes.

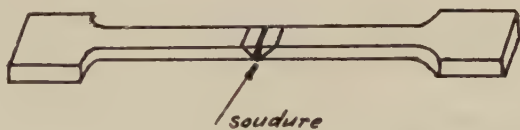


Fig. 9

De fait, le Lloyd's Register ne paraissait pas s'être soucié de ce côté de la question. Si l'épaisseur des barreaux d'essai avait changé, leur largeur était restée sensiblement constante.

La conséquence à en tirer était qu'en choisissant une éprouvette de 8 ou 18 mm. d'épaisseur environ, on pouvait obtenir des résultats plus favorables qu'avec d'autres épaisseurs.

Nous avons pensé à ce moment-là que les dimensions imposées, ou tout au moins conseillées par la commission française de standardisation, avaient eu pour but d'éviter une fraude de ce genre et qu'elles avaient permis d'avoir toujours les mêmes écarts moyens dans les résultats obtenus. Nous avons voulu le vérifier.

Bien que l'influence du laminage ait paru hors de cause avec les expériences précédentes, nous avons tenu quand même à l'éliminer aussi complètement que possible.

Nous avons donc pris une tôle d'acier de 25 mm. d'épaisseur dans laquelle nous avons obtenu par fraisage, des

éprouvettes rectangulaires et par tournage, des éprouvettes cylindriques. Pour la mesure des allongements, qui s'effectue en même temps que celle de la résistance, nous avons pris des repères correspondant à la formule standard.

$$L = \sqrt{66,67 S}$$

Nos éprouvettes avaient les caractéristiques suivantes :

Epreuves rectangulaires

Epaisseur	Largeur	L entre repères	Longueur usinée
8	30	125	200
12	25	140	200
18	25	175	250
25	20	180	250

Epreuves cylindriques

Diamètre	L entre repères
8	57,5
12	86,5
18	129,5
22,5	162

Ces dimensions, qui paraissent anormales, sont celles fixées par la commission permanente de standardisation, créée pendant la guerre au Ministère du Commerce et de l'Industrie.

Elles ont été reproduites dans le cahier des charges relatif aux produits sidérurgiques adopté par l'AFNOR (association française de normalisation) en septembre 1933.

Ce cahier de charges indique :

ART. 12. Les barreaux plats sont prélevés dans des tôles ou des laminés... Leur épaisseur est en principe celle du produit à examiner. Leur largeur et leur longueur entre repères sont choisies de manière que L et S satisfassent à la relation.

$$L = \sqrt{66,67 S}$$

Art. 14. — Tableau des éprouvettes plates

Largeur uniforme de 30 $\frac{m}{m}$ Epaisseur	Largeur uniforme de 25 $\frac{m}{m}$
3	11
4	à
5	20
6	Largeur uniforme de 20 $\frac{m}{m}$
7	21
8	à
9	37
10	

Les chiffres de traction obtenus sur deux séries d'éprouvettes sont résumés dans les tableaux 10 et 11.

TABLEAU 10
Eprouvettes de traction à section rectangulaire

Epaisseur	Largeur	R	Observations
8	30	38,8 kgs	Cassure en tête
8	30	37,8	
12	25	38,4	
12	25	37	
18	25	35	
18	25	35,7	
25	20	35,6	
25	20	35,2	

TABLEAU 11
Eprouvettes de traction à section circulaire

Diamètres	R	Observations
8	33,8	Cassure en tête
8	36,6	
12	36,2	
12	36,4	
18	37,3	
18	37	
22,5	37,6	
22,5	37,7	

En ne tenant pas compte des éprouvettes cassées près de la tête, qui donnent des résultats erratiques, on constate que :

1° La moyenne des résistances est de 36 kgs 5 pour les éprouvettes rectangulaires et de 36 kgs 9 pour les éprouvettes cylindriques, c'est-à-dire pratiquement la même.

2° Les résistances varient sensiblement en raison inverse des épaisseurs avec les éprouvettes rectangulaires et en raison directe des diamètres avec les éprouvettes cylindriques.

En réalité, deux paramètres interviennent dans la variation de la résistance des éprouvettes rectangulaires, mais nous ne pouvons tenir compte que de l'épaisseur, que nous fixons nous-mêmes. La largeur est fixée arbitrairement comme nous l'avons dit précédemment. Nous sommes obligés, pour cette dimension, de nous conformer à l'usage, si peu justifié qu'il soit.

3° L'écart maximum de résistance est de 3 kgs 8 par mm² pour les éprouvettes rectangulaires et de 1 kg. 5 pour les éprouvettes cylindriques.

On en tire les conséquences suivantes :

a) Les éprouvettes cylindriques sont préférables aux

épreuves rectangulaires parce qu'elles donnent, quel que soit leur diamètre, des résultats plus voisins de la moyenne des résistances que les éprouvettes rectangulaires.

b) Les écarts que l'on peut relever entre 8 et 12 mm. de diamètre étant les plus faibles, il y aura lieu de choisir un diamètre d'éprouvette compris entre ces limites.

Mesure de la limite apparente d'élasticité E

On n'attribue pas, tout au moins en ce qui concerne la soudure autogène, une importance suffisante à la mesure de la limite apparente d'élasticité. Aucun cahier des charges n'en fait mention.

La charge unitaire maximum au-dessous de laquelle les allongements sont purement élastiques est aussi nécessaire à connaître que la charge de rupture. C'est un renseignement capital et qui conditionne la sécurité.

Nous avons relevé sur les diagrammes de traction, au cours des essais précédents, les chiffres du tableau 12.

TABLEAU 12
Limite apparente d'élasticité

Epaisseur ou diamètre	Eprouvettes rectangulaires	Eprouvettes cylindriques
8	30	23,8
8	28,3	25,2
12	28,3	26,9
12	28,3	26,5
18	25,3	27,5
18	24,6	27,4
25/22,5	25,8	28,9
25/22,5	25,8	27,7

La conclusion est la même que pour les essais de résistance à la traction.

Les variations de la limite apparente d'élasticité sont du même ordre que celles de la résistance. La limite d'élasticité augmente quand les diamètres croissent, et diminue quand les épaisseurs augmentent, pour le cas des éprouvettes rectangulaires. La moyenne est de 26 kgs 8 par mm².

L'éprouvette la plus convenable aura un diamètre voisin de 12 mm.

Remarques au sujet des essais de résistance à la traction et de limite apparente d'élasticité

Certains phénomènes consécutifs à des efforts de traction non poussés jusqu'à la rupture, méritent d'être rappelés par les effets qu'ils peuvent avoir sur les valeurs ultérieures de R et de E.

Si l'on effectue une traction en deux étapes, en s'arrêtant en B (figure 13) et en revenant à zéro et que l'on recommence l'essai immédiatement après, la ligne des efforts sur le diagramme de traction est O A B C.

Elle est identique à celle que l'on aurait obtenue primitivement en allant jusqu'à la rupture. Le point B marque seulement une nouvelle valeur de la limite élastique.

La première traction a déterminé un léger écrouissage, qui n'a eu d'action que sur E.

Si la deuxième opération n'a lieu que plusieurs heures après la première, on constate une augmentation sensible de R et de E. L'écrouissage est plus prononcé, on l'appelle aussi « vieillissement ». Le diagramme des efforts devient O' B' C' (figure 14).

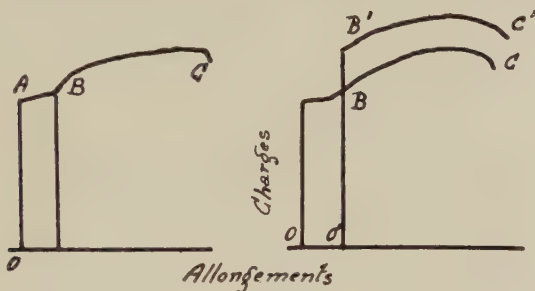


Fig. 13

Fig. 14

L'effet de vieillissement, qui demande plusieurs jours à la température ordinaire pour être complet, n'exige que quelques minutes quand l'on chauffe le métal entre 150 et 300°.

Mesure de l'allongement A %

La précaution que nous avons prise de placer des repères déterminés par la formule

$$L = \sqrt{66,67 S}$$

sur nos éprouvettes de traction, nous a permis de déterminer les allongements. Cette formule ne détermine, bien entendu, que l'allongement total. Nous sommes dans l'obligation de l'employer, puisque c'est la seule en usage en France. Elle ne donne que des résultats approximatifs. Nous dirons plus loin comment on peut la corriger. De plus, pour le cas des éprouvettes rectangulaires, l'absence de similitude géométrique des éprouvettes enlève tout intérêt aux mesures que l'on peut faire. Là encore, nous avons observé les règles de l'association française de normalisation.

Nous avons obtenu les chiffres du tableau 15.

TABLEAU 15
Allongements $L = \sqrt{66,67 S}$

Epaisseur ou diamètre	Eprouvettes rectangulaires	Eprouvettes cylindriques
8	27	27
8	28,6	30,5
12	28,6	27,2
12	30	24,9
18	32,6	28,1
18	31,4	28,9
25/22,5	30,8	24,6
25/22,5	32	25,9

De plus, comme certains pays ont l'habitude de mesurer l'allongement des barreaux cylindriques sur 5 diamètres, nous les avons relevés pour cette valeur de L .

TABLEAU 16
Allongements $L = 5 D$

Repères	Eprouvettes cylindriques
8 -1	27,5
8 -2	35
12 -1	30
12 -2	30
18 -1	32,2
18 -2	32,2
22,5-1	28
22,5-2	28,2

Il convient de noter que les chiffres obtenus dans ce cas ne sont supérieurs aux premiers que parce qu'ils correspondent généralement à la zone de striction. Ceci provient de ce que les repères destinés à la mesure de l'allongement sont placés symétriquement par rapport à l'axe de l'éprouvette et que la striction se produit au milieu de l'éprouvette dans le plus grand nombre de cas. Il arrive cependant que la zone de striction soit plus rapprochée d'une des extrémités.

Les Américains mesurent l'allongement des barreaux rectangulaires sur 50 mm., les Anglais sur 203 mm., et le résultat de ces divergences est qu'il ne faut tenir compte des chiffres publiés à l'étranger qu'avec la plus grande prudence.

La loi de similitude ne joue pas dans toutes ces mesures.

Les efforts de traction lente donnent un écrouissage plus prononcé sur les éprouvettes rectangulaires minces et sur les éprouvettes cylindriques de gros diamètres.

En outre, on peut remarquer que le produit $R \times A$ passe de 825 à 1.116 pour le même métal puisqu'il s'agit d'éprouvettes fraisées ou tournées dans la même tôle.

Or, un certain nombre d'administrations ont pris l'habitude de juger la qualité d'une soudure par la valeur de ce produit. Cet errement a été emprunté aux métallurgistes. C'est une indication inutile et même nuisible tant que l'on n'a pas défini la forme et les dimensions de l'éprouvette.

Nous dirons, enfin, que l'allongement tel qu'il est défini par la Commission française de Standardisation ne nous donne pas entièrement satisfaction.

Cette formule comporte, en effet, une cause d'erreur qui est la striction. Nous verrons plus loin comment la striction peut être influencée par la section de l'éprouvette.

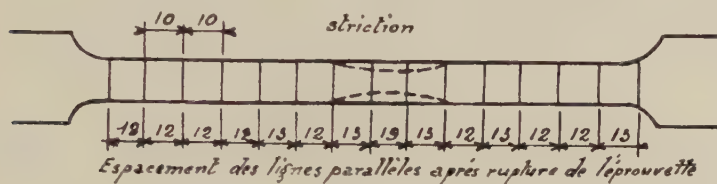


Fig. 17

La zone de striction ne devrait pas, en bonne logique, concourir à la mesure de l'allongement.

Dans la suite de cette étude, nous mesurerons l'allongement total, mais seulement à titre d'indication. Nous n'attacherons d'importance qu'à l'allongement « homogène » qui ne tient pas compte de la striction.

Pour mesurer ces différents allongements, nous avons gradué nos éprouvettes de 10 mm. en 10 mm. avant traction, et nous avons mesuré après rupture les allongements de chaque intervalle (fig. 17). La figure 18 montre les allongements obtenus sur l'éprouvette 12-2.

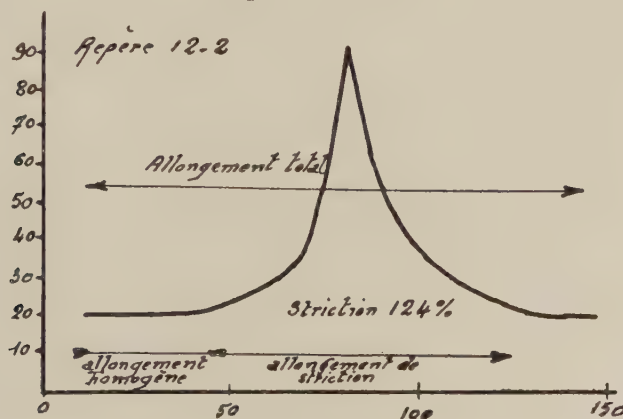


Fig. 18

On s'aperçoit que l'allongement en dehors de la zone de striction est en moyenne de 20 %, et qu'il monte dans cette zone jusqu'à 100 % (figure 18).

La graduation des éprouvettes rectangulaires avait eu, en même temps, pour but de voir si des lignes perpendiculaires à l'axe et régulièrement espacées, restaient parallèles après traction. Elles ont gardé la même position relative. Cependant, elles ont disparu dans la zone de striction.

On peut donc définir trois sortes d'allongements :

l'allongement total $L = \sqrt{66,67} S$

l'allongement homogène (striction exceptée),

et l'allongement de striction.

Mesure de la résilience ρ .

La mesure de la résilience, ou résistance au choc, est due pour la plus grande part aux travaux d'André LE CHATELIER, Ingénieur en Chef de la Marine.

Il avait constaté que certains aciers, notamment ceux qui contenaient du phosphore, présentaient parfois, à l'usage, une grande fragilité, que les essais habituels étaient impuissants à déceler. Des aciers qui avaient donné des résultats satisfaisants à l'allongement et au pliage se brisaient comme du verre dans certaines circonstances.

André LE CHATELIER reconnut que la rupture par flexion d'un barreau entaillé sur la face soumise à l'allongement, est accompagnée, dans le cas des aciers fragiles, par une déformation presque nulle.

Il fit part de ses recherches à CONSIDÈRE, qui les mentionna dans une communication à la Commission des Méthodes d'Essais, le 9 novembre 1892. GODRON, directeur des Constructions Navales, BARBA, directeur du Creusot, AUSCHER, Ingénieur de la Marine, étudièrent cette méthode. FREMONT, CHARPY, MESNAGER, proposèrent, pour sa réalisation, des dispositifs spéciaux actuellement très répandus.

Le rôle d'André LE CHATELIER dans la mesure de la résilience a été souvent passé sous silence. Dernièrement encore M. DE FREMINVILLE, Président de la Société des Ingénieurs Civils, attribuait à CONSIDÈRE la paternité des essais de choc.

Il existe un grand nombre de types de barreaux de choc.

Les Anglais ont codifié le barreau Izod qui donne des résultats erratiques, parce que les entailles sont à arête vive.

En France, la Marine partage ses préférences entre un barreau non entaillé, d'un usage assez surprenant, le barreau MESNAGER, et le barreau U. F. standardisé.

Ces deux derniers, employés indifféremment dans l'industrie, ne diffèrent que par la profondeur de l'entaille.

Le barreau MESNAGER (figure 19) aura nos préférences à cause de la constance de ses résultats.

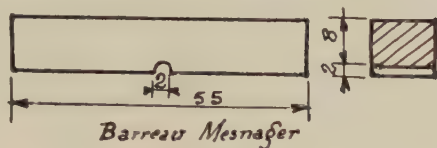


Fig. 19

Il est essentiel de noter que la loi de similitude est encore moins applicable à la mesure de la résilience qu'à celle de l'allongement. L'emploi d'un seul type de barreau est indispensable.

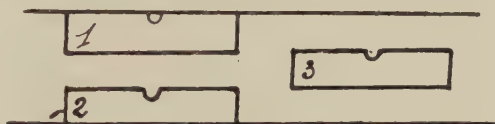


Fig. 20

Pour compléter nos essais précédents, nous avons prélevé dans notre tôle de 25 mm. trois barreaux MESNAGER placés comme l'indique la figure 20. Les éprouvettes étaient perpendiculaires au sens du laminage. Nous avons obtenu les chiffres suivants :

TABLEAU 21
Essais de résilience

Repères	ρ en kgs par $\%m^2$
1	17,45
2	19,10
3	12,40

L'influence de la dernière passe de laminage, faite à température relativement basse, est prépondérante. Cette température est de l'ordre de celle du revenu. Elle augmente la résilience.

A l'intérieur de la masse de la tôle, la température — plus élevée — produit l'effet d'un recuit prolongé. La résilience diminue.

On retiendra de cette expérience les indications suivantes pour le prélèvement des barreaux de choc.

1° L'épaisseur de la tôle doit être indiquée.

2° L'emplacement de l'éprouvette et de son entaille doivent être toujours les mêmes.

On peut aussi mesurer l'angle de rupture en rapprochant les deux fragments de l'éprouvette. Toutefois cette mesure

ne présente que peu d'intérêt, l'angle ne correspondant pas toujours exactement à l'effort de rupture comme le montre le tableau 22 qui correspond à des essais effectués au Laboratoire du Conservatoire des Arts et Métiers sur douze barreaux constitués par du métal fondu à l'arc électrique.

Cette approximation nous fera écarter le relèvement des angles de pliage. La résilience nous suffira.

TABEAU 22
Correspondance entre le pliage des barreaux de choc
et la résilience

Angle de pliage	ρ Mesnager
22°	6,5
28°	8,8
31	9,1
31	9,4
32	10
35	10
35	10,4
37	11
37	12,3
39	12,3
42	12,3
38	12,6

La recherche de la résilience a été la source de tous les progrès en soudure autogène. Cette qualité conditionne toutes les autres. Nous n'avons pas trouvé d'exemple qu'un métal sans fragilité n'ait pas en même temps une résistance satisfaisante et un bon allongement.

Mesure de la striction Σ

Nous n'attribuerons à la striction, définie par la formule :

$$\Sigma = \frac{S - S'}{S'} \times 100$$

qu'une valeur relative, pour deux raisons. La première est qu'elle varie avec la forme de l'éprouvette et la seconde qu'elle caractérise plutôt les métaux laminés ou forgés que les métaux coulés.

Les tableaux 23 et 24 montrent que la striction peut varier de 97 à 190 % avec le même métal, suivant la forme de l'éprouvette.

TABLEAU 23

Striction des éprouvettes rectangulaires

Epaisseur	Largeur	Σ Epaisseur	Σ Largeur	Σ totale
8	30	60 %	48	128
8	30	70	40	140
12	25	50	39	108
12	25	58	42	124
18	25	70	39	150
18	25	65	48	143
25	20	60	61	161
25	20	55	58	147

Comme nous l'avons déjà dit à propos de la mesure de l'allongement, l'absence de similitude géométrique des éprouvettes empêche qu'on tienne compte de la striction ainsi observée.

TABLEAU 24

Striction des éprouvettes cylindriques

Repères	Diamètre	Σ
8-1	8	170
8-2	8	190
12-1	12	114
12-2	12	104
18-1	18	97
18-2	18	108
22,5-1	22,5	110
22,5-2	22,5	108

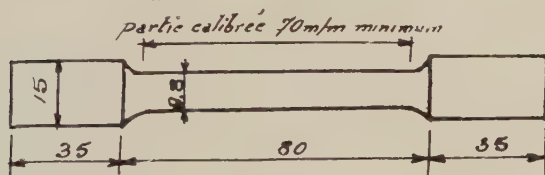


Fig. 25

**Essais des soudures autogènes
et des métaux soudés**

Les conclusions à tirer des pages précédentes sont les suivantes :

1° On ne doit entreprendre d'essais mécaniques que si la forme et la dimension des éprouvettes sont parfaitement déterminées.

2° L'éprouvette qui convient le mieux pour la mesure de R. E et A % est une éprouvette cylindrique de 8 à 12 mm de diamètre. Nous choisirons pour tous nos essais une éprouvette de 9,8 mm pour laquelle la longueur entre repères pour la mesure de l'allongement est de 70 mm (figure 25).

3° Les essais de choc seront faits avec un barreau Mesnager (figure 19).

CHAPITRE III

EXAMEN D'UN ASSEMBLAGE SOUDÉ

Nous n'examinerons que le cas de l'assemblage bout à bout de deux tôles d'acier à faible teneur en carbone, et nous chercherons dans quelles parties de l'assemblage il conviendra de faire des investigations (fig. 26).

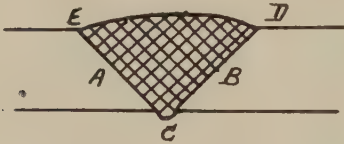


Fig. 26

Le chanfrein à 45° préparé pour l'addition de métal d'apport sera fait au chalumeau oxyacétylénique.

La température élevée due à l'oxydation du métal que produit la coupe, a pour effet une perturbation légère définie par la filiation microscopique de la figure 27, due à M. Roux.

L'examen de cette filiation montre que la coupe au chalumeau d'une tôle de 15 mm. d'épaisseur apporte des modifications de structure sur 13/10 mm. à partir du bord de la coupe.

Il y a surchauffe sur 4/10 et la résilience diminue dans cette zone. De 4/10 à 9/10, il y a une

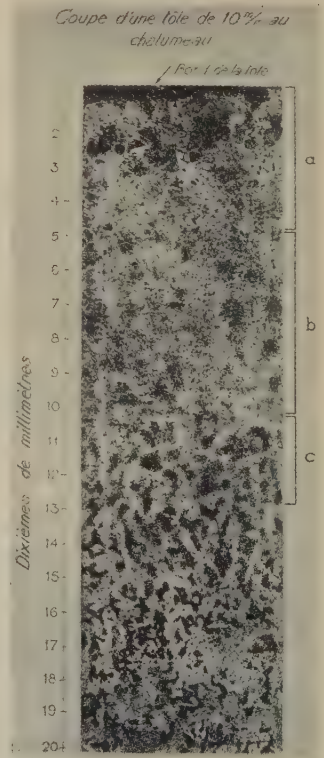


Fig. 27

trempe légère visible à la structure sorbitique du métal. De 9/10 à 13/10, on trouve la perlite frisée, qui est l'indice d'un refroidissement rapide sur les aciers à faible teneur en carbone.

La résistance à la traction est augmentée de 1,5 à 2 kgs dans la zone perturbée.

La modification des abords de la coupe, intéressante à noter, est sans importance sur la soudure qui va soumettre ces abords à une température fort élevée.

La soudure faite, nous aurons à examiner, d'abord le métal fondu, puis la tôle au voisinage de la soudure.

Les bords A et B du chanfrein (figure 26) sont portés à la fusion et le triangle C D E est rempli de métal fondu. La température des tôles au voisinage de A et B est très élevée. Elle va en décroissant vers les extrémités des tôles soudées, et cette décroissance est fonction du procédé employé : chalumeau, arc électrique ou hydrogène atomique.

Des transformations moléculaires se produisent, qui sont la conséquence, et de la température et d'efforts de contraction que nous essaierons d'évaluer.

Ces efforts pourront faire varier les qualités mécaniques des tôles. Nous examinerons ce point en détail avec chaque procédé de soudure dans les chapitres suivants.

Pour le moment, cherchons au moyen d'expériences simples, la répartition des températures dans les tôles soudées et le sens des contractions.

Répartition des températures et des contractions dans deux tôles de $250 \times 250 \times 15$ soudées au chalumeau oxyacétylénique

Les tôles ont été soudées avec un chalumeau débitant 2.000 litres d'acétylène à l'heure, le chanfrein ayant été

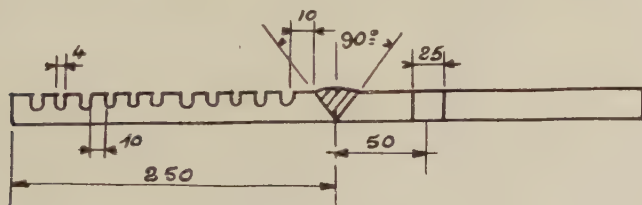


Fig. 28

rempli d'un seul coup. L'opération a duré 24 minutes. Nous avons percé au préalable sur l'une des tôles, au milieu de la largeur et sur une perpendiculaire à la soudure, une série de trous de 4 $\frac{m}{m}$ de diamètre, distants de 10 $\frac{m}{m}$ d'axe en axe. Ces trous étaient destinés à placer un pyromètre au cours de la soudure.

Nous avons percé également un trou de 25 mm. sur l'autre tôle, au milieu et à 50 mm. du bord inférieur du chanfrein, dans le but de mesurer les déformations éventuelles de la tôle après refroidissement (fig. 28).

Il aurait sans doute été préférable de percer deux trous de 2 ou 3 $\frac{m}{m}$ seulement à 25 $\frac{m}{m}$ d'axe en axe pour éviter une perturbation thermique et mécanique. Nous avons adopté le trou de 25 mm. à cause de la facilité qu'il présentait pour nous, pour la mesure de ses déformations avec des instruments simples.

Nous avons trouvé les températures suivantes, la soudure ayant été arrêtée à la hauteur de la ligne de trous.

TABLEAU 29
Répartition des températures dans deux tôles
de 250×250×15 soudées au chalumeau oxyacétylénique

Distance du bord supérieur du chanfrein en $\frac{m}{m}$	Température degré C.
10	1120
20	960
30	600
40	490
50	460
60	460
70	460
80	380
90	360
100	330
110	300
120	280
130	270
140	260
150	250
160	220
170	210
180	190
190	190
200	190

On note un palier à 460°. Il y a eu dégagement de chaleur vers 400/450°. Cette particularité avait été indiquée par OSMOND vers 1897, pour les aciers trempés ou écrouis. Or l'examen des dimensions du trou de 25 $\frac{m}{m}$ révèle un écrouissage car ses dimensions sont passées à 25,4 $\frac{m}{m}$ dans le sens perpendiculaire à la soudure, et à 24,7 $\frac{m}{m}$ dans l'autre sens.

On pourrait nous objecter que toutes les tensions se centralisent sur un trou percé dans une tôle. Nous citerons donc une autre expérience faite en 1922 par M. HØHN, Ingénieur en Chef de l'Association Suisse de Propriétaires de Chaudières. Nous la rappellerons brièvement.

M. HÆHN avait pris une tôle de 22 mm. d'épaisseur ayant comme caractéristiques

$$R = 38$$

$$E = 23,2$$

c'est-à-dire avec une faible teneur en carbone. Il l'avait recuite pendant 30 minutes à 800° , puis il avait tracé sur

sa surface deux axes perpendiculaires et une série de cercles concentriques (fig. 30).

La distance des points d'intersection des axes et circonférences ayant été mesurée à $1/100^{\circ}$ mm près, la tôle fut chauffée au chalumeau dans sa partie centrale sur une surface circulaire de 200 mm de diamètre pendant 15 minutes.

On observa, autour de la zone rouge, une zone noire de 300 mm de diamètre, puis une zone colorée aux couleurs du recuit de 690 mm .

Après refroidissement à l'air, les mêmes mesures furent répétées et donnèrent les résultats suivants :

TABLEAU 31
Modifications dans les dimensions d'une tôle
Après un chauffage local au rouge

Repères	Dimensions		Différences
	avant chauffage	après chauffage	
M-1	79,88	78,86	1,02
M-2	79,88	78,34	1,49
M-3	79,94	78,84	1,10
M-4	79,94	78,41	1,53
M-9	119,83	118,92	0,91
M-10	119,81	118,22	1,59
M-11	119,81	118,87	0,94
M-12	119,85	118,27	1,58
M-33	279,90	279,66	0,24
M-34	279,97	278,55	1,42
M-35	279,97	279,63	0,34
M-36	279,95	278,48	1,47

Le rapprochement atteint son maximum sur l'axe Mx, entre les points 10-12, pour une distance de 239,66 mm

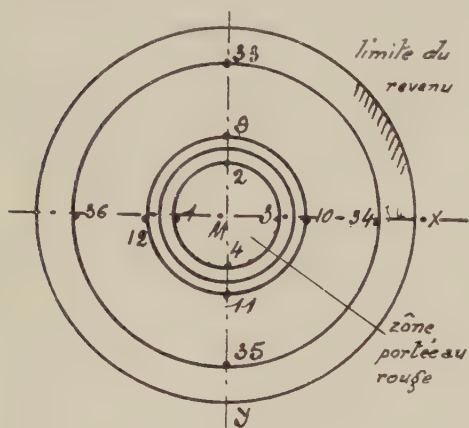


Fig. 30

avant chauffage et de 236,49 $\frac{m}{m}$ après refroidissement. La tôle ayant servi à ces essais était rectangulaire. Les deux axes M x et M y, correspondant aux repères étaient ceux correspondant aux dimensions maximum et minimum de la tôle.

Ces points sont situés à la limite de la zone chauffée au rouge.

La même tôle ayant été chauffée une seconde fois, on a procédé aux mêmes vérifications. Un nouveau rapprochement s'est produit, mais moins important que le premier. Sa valeur maximum a été de 1,30 mm. pour deux points distants de 236 $\frac{m}{m}$. Ce maximum correspondait à celui de la première expérience.

Huit jours après le refroidissement des tôles, on pouvait observer une légère contraction, sans toutefois qu'il soit possible de la mesurer exactement, sa valeur étant trop faible.

Ces expériences indiquaient la présence de tensions dans les tôles et conséquemment de phénomènes d'écrouissage. Cependant M. HÆHN n'avait pas poussé plus loin ses recherches.

Indiquons, en passant, que certains praticiens obtiennent le redressement des tôles déformées en les chauffant au rouge à l'endroit des bosses et en les refroidissant ensuite brusquement. Ce traitement est connu sous le nom de « chaudes de retrait ».

Nous avons cherché à mesurer par un essai à la bille de Brinell, les variations de résistance provenant de l'écrouissage en utilisant la correspondance entre la dureté et la résistance. Nous avons eu les résultats suivants :

TABLEAU 31 bis

Distance du bord supérieur du chanfrein	R par correspondance avec Δ (dureté Brinell) d'après les tables de concordance expérimentale
10	45
20	46
30	45
..	..
90	45
100	42
110	40
120	38

Répartition des températures et des contractions dans deux tôles de 250 × 250 × 15 soudées à l'arc électrique avec électrodes métalliques.

Au chalumeau, nous avons rempli d'un seul coup notre chanfrein. C'est une méthode. Il en est une autre qui con-

siste à faire plusieurs passes de métal d'apport, mais qui n'est pas pratique. En soudure à l'arc, les passes répétées sont la règle parce que l'on cherche à éviter les déformations en chauffant aussi peu que possible les pièces à assembler.

Pratiquement, chaque passe a le temps de refroidir complètement avant que l'on dépose la suivante. Les qualités du métal fondu se trouvent améliorées par ces recuits successifs.

Au point de vue de la répartition de la chaleur, on observe des différences suivant l'importance de la passe de métal d'apport.



$$S_2 = 2S_1$$

Fig. 30 bis

Nous avons pris ensuite en soudure à l'arc pour la mesure des températures deux tôles semblables aux précédentes. Le remplissage a été fait en plusieurs passes avec des électrodes de 4 $\frac{m}{m}$ de diamètre auxquelles on appliquait un débit de 130 ampères correspondant à l'épaisseur de leur enrobage.

La deuxième passe avait une section double de la première. Nous avons fait deux mesures de température (fig. 30 bis).

TABEAU 32

Variations de température dans deux tôles de $250 \times 250 \times 15$ soudées à l'arc électrique avec électrodes métalliques

Distance du chanfrein $\frac{m}{m}$	Température mesurée	
	Après la 1 ^{re} passe (degrés)	Après la 2 ^e passe (degrés)
10	250	285
20	220	270
30	190	250
40	160	220
50	130	180
60	110	165
70	90	150
80	70	125
90	60	110
100	50	100
110	30	85
120	30	78
130	30	70
140	30	65
150	30	60
160	30	55
170	30	50
180	30	45
190	30	40
200	30	30

L'ovalisation du trou de 25 $\frac{m}{m}$ a été presque insensible. Elle n'a pas dépassé 1/10 $\frac{m}{m}$. Ceci n'implique pas qu'à une courte distance de la soudure les phénomènes d'écroutissage aient disparu, mais qu'ils étaient difficilement vérifiables par des essais mécaniques tels que ceux que nous avons employés. Des contraintes peuvent en effet correspondre à des déplacements relatifs très petits des portions contiguës.

Nous possédons sur ce point quelques renseignements à la suite d'expériences faites par M. T. M. L. JASPER à Milwaukee (U.S.A.), mais sur des tôles de 75 mm. d'épaisseur, et avec un chanfrein d'une forme assez particulière. Les résultats en sont résumés sur la figure 33. La soudure était plus résistante que la tôle.

La mesure de la résistance par l'essai à la bille de Brinell confirme les essais de M. JASPER.

TABLEAU 32 bis

Distance du bord supérieur du chanfrein	R par correspondance avec Δ (dureté Brinell)
10	42
20	40
30	38
100	38

D'autre part, en ce qui concerne la répartition des températures, M. E. VARRIOT a établi une courbe d'échauffe-

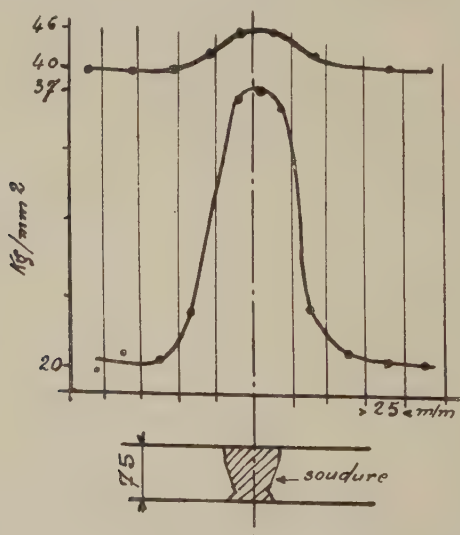


Fig. 33

ment qui s'encadre exactement dans les chiffres du tableau 32.

Jusqu'ici, nos soudures ont été faites sur des tôles qui pouvaient se dilater et se contracter librement, compte tenu de la solidification du bain de fusion, au fur et à mesure de l'avancement de la soudure. C'est d'ailleurs ainsi que nous continuerons à opérer. Cependant il peut être intéressant de rechercher ce que seraient devenues des tensions même faibles dans des tôles libres, si ces tôles avaient été solidement bridées.

Deux ingénieurs allemands : MM. ICHULTZ et PIUGEL ont donné à ce sujet les chiffres résumés dans la figure 34.

Ils ont soudé des tôles contenant 0,09 C et 0,50 Mn, c'est-à-dire très voisines des nôtres.

Les essais ont été faits avec des électrodes nues et avec des électrodes enrobées, dont le métal avait la même composition que celui des tôles.

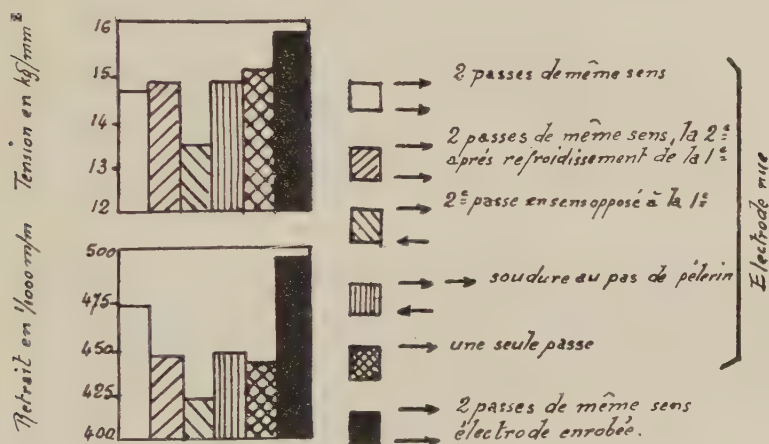


Fig. 34

Les tôles étaient fixées sur une plaque épaisse ne pouvant subir aucune déformation. Elles avaient comme dimensions $300 \times 156 \times 10$, la cote 156 étant la longueur soudée.

Les tensions ont varié de 13,5 kgs/mm² à 15,8 kgs.

Nous ne donnons ces chiffres qu'à titre documentaire, car nous avons toujours dit qu'en soudure, il fallait assurer la libre dilatation des tôles, à moins que l'on ne puisse opérer un recuit complet des pièces soudées. Un recuit partiel ne détruit aucune tension.

Répartition des températures et des tensions dans deux tôles de $250 \times 250 \times 15$ soudées à l'hydrogène atomique

Avec l'hydrogène atomique, le chanfrein n'est plus nécessaire. On soude à franc bord. Si la pièce n'est pas traversée, on la retourne pour faire une deuxième passe.

Bien que l'on puisse souder en une seule fois une épaisseur de 15 $\frac{m}{m}$, nous nous sommes mis dans le cas le plus défavorable pour la mesure de la température et des tensions, et nous avons fait une reprise.

Le chalumeau, ou plutôt la torche, pour suivre la technologie, était triphasée. On lui appliquait un courant de 70 ampères sous 220 volts. La chute de tension était de 110 volts. L'énergie active était de 14 kw 96.

Les mesures de température ont été faites deux fois, la tôle n'ayant pas été refroidie. Au total, la soudure a duré six minutes, soit quatre fois moins qu'au chalumeau.

C'est cette faible durée qui explique les chiffres obtenus pour la dissipation de la chaleur dans la tôle, et qui sont moindres qu'au chalumeau.

TABLEAU 35.

**Répartition des températures dans deux tôles de
250×250×15 soudées à l'hydrogène atomique**

Distance de l'axe de la tôle	Températures	
	Après 1 ^{re} passe (degrés)	Après 2 ^e passe (degrés)
10	380	490
20	340	490
30	330	465
40	300	440
50	275	380
60	230	340
70	210	315
80	180	275
90	165	245
100	140	220
110	120	205
120	108	180
130	100	165
140	100	155
150	80	140
160	60	125
170	55	110
180	55	100
190	55	80
200	55	80

Les dimensions du trou percé dans la deuxième tôle étaient les suivantes après la première soudure : 25,26 et 25,28 $\frac{m}{m}$.

Le grand axe du trou ovalisé était parallèle à la ligne de soudure. Le petit axe était perpendiculaire à cette ligne.

Après la deuxième soudure, nouveau retrait. On avait 25,24 et 25,4 $\frac{m}{m}$.

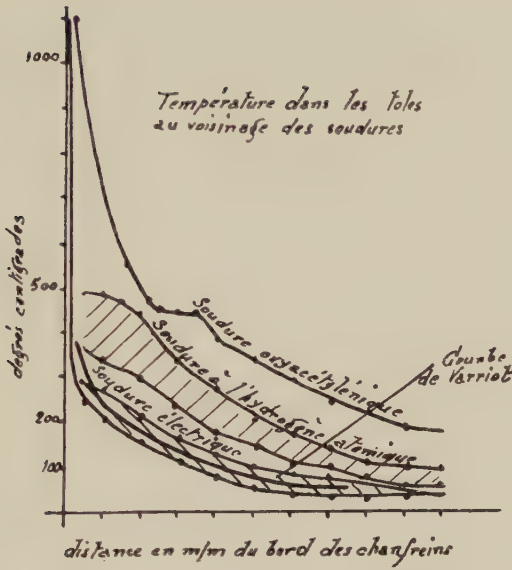


Fig. 36

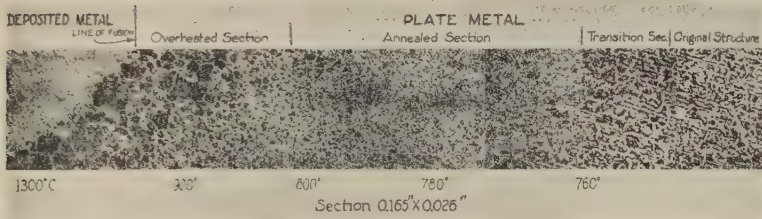


Fig. 36 bis

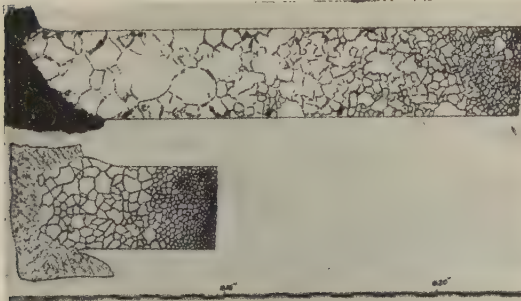


Fig. 37

La mesure de la résistance par l'essai à la bille n'a indiqué aucune augmentation de la résistance, ce qui est dû probablement à la décarburation du métal au voisinage de la soudure.

Nous avons résumé dans les courbes de la figure 36 les chiffres des tableaux 29, 32 et 35.

Nous avons tracé également sur la figure 36 la courbe d'échauffement de M. VARRIOT. Elle concorde avec la nôtre.

Remarquons qu'en ce qui concerne la soudure à l'hydrogène atomique, on retrouve vers 460° le même palier que dans la soudure au chalumeau.

Un écrouissage dû à la solidification du métal depuis l'origine de la soudure jusqu'à l'endroit où nous avons mesuré les températures avait produit le phénomène indiqué par OSMOND et dont nous avons parlé précédemment (dégagement de chaleur vers $400/450^{\circ}$ pour les aciers trempés ou écrouis).

Nous reproduisons (figure 36 bis) une micrographie établie par M. A. G. BISSEL, qui complète la courbe de répartition des températures en soudure à l'arc. La figure 37 due au même ingénieur représente à la partie supérieure une soudure au chalumeau et à la partie inférieure une soudure à l'arc. Elle complète et confirme nos résultats.

CHAPITRE IV

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOUDURES OXYACÉTYLÉNIQUES RÉALISÉES SUR DES TÔLES À FAIBLE TENEUR EN CARBONE. VARIATIONS DE COMPOSITION DU MÉTAL D'APPORT.

Conditions de réalisation

Tôles

Les dimensions des tôles dont nous nous sommes servis précédemment n'avaient pas été choisies arbitrairement.

Leur épaisseur était suffisante pour que l'on puisse prélever des barreaux de traction et des barreaux de choc. Leur largeur permettait de se rendre compte, au moins approximativement, de la zone de perturbation.

La figure 36 montre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une largeur supérieure à 100 mm. Au delà de 100 mm., la température relevée dans les tôles au cours de la soudure n'est pas assez élevée pour avoir de l'influence sur les caractéristiques mécaniques du métal. Pour avoir une marge de sécurité dans nos essais, nous avons pris la largeur de 125 mm. Nos éprouvettes avaient donc comme dimensions : $250 \times 125 \times 15$, la soudure ayant 250 mm. de longueur.

Les tôles étaient chanfreinées au chalumeau à 45° .

Leurs caractéristiques mécaniques et physiques étaient les suivantes :

Caractéristiques mécaniques de deux éprouvettes prises dans le sens du laminage

	1 ^{re} éprouvette	2 ^e éprouvette	Moyenne
R	36,6	37	36,8
E	22,6	24,6	23,6
A ₁ (A total)	37	36	36,5
A ₂ (A homogène)	32	30	31
A ₃ (A de striction)	85	85	85
A ₄ (A sur 5 D)	41	40	40,5
Σ	267	260	263,5

Résilience

Eprouvette en long $\rho = 14,68$,
 Eprouvette en travers $\rho = 13,1$.

Caractéristiques physiques

C = 0,034.
 Mn = 0,418.
 P = 0,04.
 S = 0,019.
 Si = 0,005.

Métal d'apport

Nous nous sommes servis d'abord d'un acier à faible teneur en carbone. Ses caractéristiques mécaniques importent peu, puisqu'il doit être fondu.

C = 0,077.
 Mn = 0,286.
 P = 0,026.
 S = 0,033.
 Si = 0,009.

Nous prendrons ensuite des métaux contenant plus de manganèse et au besoin du nickel, du chrome ou du cuivre.

Prélèvement des éprouvettes

Nous prélèverons une éprouvette de traction et une éprouvette de choc.

- a) dans le métal fondu au chalumeau;
- b) dans la tôle, au voisinage de la soudure;
- c) dans la tôle, à 100 mm. du bord du chanfrein.

Nous prélèverons également une éprouvette en travers de la soudure pour mesurer la valeur de la liaison tôle-soudure.

Exécution des soudures

Nous chercherons à nous mettre le plus près possible des conditions de la pratique : réparation d'une tôle de chaudière accessible sur une seule face, ou construction d'un réservoir à l'intérieur duquel il n'est pas possible de pénétrer pour faire une reprise.

On nous objectera que si les tôles de chaudières peuvent avoir quinze millimètres d'épaisseur, cette épaisseur est exceptionnelle pour des réservoirs inaccessibles de l'intérieur.

Nous avons déjà dit que nous avons pris 15 mm. pour prélever facilement nos éprouvettes de traction et de choc.

La question essentielle reste pour nous de ne pas avoir fait de reprise et d'avoir rempli le chanfrein d'un seul coup.

Les résultats que nous aurons obtenus pourront se vérifier pour des épaisseurs moindres pour lesquelles il ne peut être question ni de reprise ni de plusieurs passes de métal d'apport.

Nous convenons parfaitement que les passes nombreuses et les reprises, qui ont le même effet, produisent un recuit salubre des tôles et augmentent notamment la résilience qui se trouve multipliée par 5 environ, pour les aciers à faible teneur en carbone.

Si nous arrivons à un résultat satisfaisant dans les conditions difficiles où nous nous sommes placés volontairement, nous aurons contribué davantage au développement de la soudure au chalumeau oxyacétylénique qu'en gardant pour nous toutes les facilités.

Débit du chalumeau

Il est d'usage de prendre un débit de 100 litres d'acétylène à l'heure par millimètre d'épaisseur. Nous nous sommes donc servis tout d'abord d'un chalumeau de 1.500 litres, alimenté par de l'acétylène dissous.

Nous l'avons ensuite remplacé par un chalumeau de 2.000 litres, alimenté par de l'acétylène dissous, puis par de l'acétylène à basse pression, non épuré (afin de voir également l'influence des impuretés de l'acétylène).

Nous avons ensuite déréglé volontairement notre chalumeau en y envoyant soit un excès d'acétylène, soit un excès d'oxygène. Les temps de soudure ont été les suivants :

(Longueur de soudure : 250 mm.).

TABLEAU 38

Repère des épreuves	Débit	Réglage du chalumeau	Nature de l'acétylène	Temps
1	1.500	normal	acétylène dissous	32'
2	2.000	normal	acétylène dissous	24'
3	2.000	excès d'acétylène	acétylène dissous	28'
4	2.000	excès d'oxygène	acétylène dissous	28'
5	2.000	normal	acétylène basse pression	24'

Le gain de temps pour une flamme normale s'est révélé exactement proportionnel au débit des gaz. Cependant, ceci n'est vrai que dans certaines limites. On ne peut pas tirer de loi générale de nos expériences quant à la relation existant entre le débit et le temps.

Vérification de la liaison du métal d'apport et des tôles

La composition des tôles indique suffisamment leur soudabilité : faible teneur en carbone, en soufre et en phosphore. Nous avons cependant fait une vérification supplémentaire en prélevant une éprouvette de traction perpendiculaire aux soudures, la partie soudée étant au centre de l'éprouvette. Les résultats de traction et la mesure de la limite apparente d'élasticité se trouvent dans le tableau 40.

TABLEAU 40

Caractéristiques mécaniques de la liaison tôle-soudure

Repères	R	E
1	33,3	31,3
2	33,3	28,5
3	25,3	21,3
4	28	24,2
5	33	29

ANALYSE DES ESSAIS

Influence du débit du chalumeau sur les caractéristiques mécaniques et physiques de la soudure

Résistance à la traction. — Les variations de résistance sont faibles, tout au moins pour les réglages normaux de la flamme oxyacétylénique. La plus haute valeur correspond au débit le plus faible.

TABLEAU 39

Caractéristiques mécaniques et analyse du métal déposé

Repères	Caractéristiques mécaniques							Analyse				
	R	E	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ρ	C	Mn	P	S	Si
1	35,3	26,6	13,5	12	30	16	0,475	0,024	0,033	0,028	0,021	0
2	34	20,6	22,8	16,1	40	25	0,91	0,04	0,27	0,029	0,016	0,004
3	32,6	18,6	14,3	12	40	15	1,26	0,05	0,30	0,034	0,02	0
4	31,7	18,6	12,9	11	45	14	1,12	0,029	0,29	0,037	0,018	0
5	34,2	20,6	23	20	50	26	1,22	0,037	0,32	0,057	0,03	0

TABLEAU 39 bis

Caractéristiques mécaniques des tôles

Repères	A côté des soudures							A 100 v _m des soudures						
	R	E	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ρ	R	E	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ρ
1	46	32	24,3	18,3	60	28	10,8	45,1	30	27	18	70	33	10
2	43,6	30	24,3	17,5	70	29	9,5	46	31,3	29	22,5	90	34	11,4
3	44,6	32	33	25	100	38	10	46	28,6	33	25	100	38	9,4
4	45,7	31,7	30	20	100	34	11,2	42	31,7	27,6	20	80	34	9,4
5	45,3	31,6	30	22	100	35	10	45,3	30	30	22	100	34	9,8

Moyennes

	R	E	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ρ	R	E	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	ρ
	44,64	31,46	28,32	20,56	86	32,8	10,3	44,88	31,2	29,32	21,5	88	34,6	10

Le dérèglage de la flamme diminue la résistance de plus de 10 %, écart d'autant moins admissible que ce dérèglage ne procure par ailleurs aucun avantage. Il a, au contraire, le grave inconvénient de provoquer un grossissement extraordinaire du grain du métal, particulièrement dans le cas

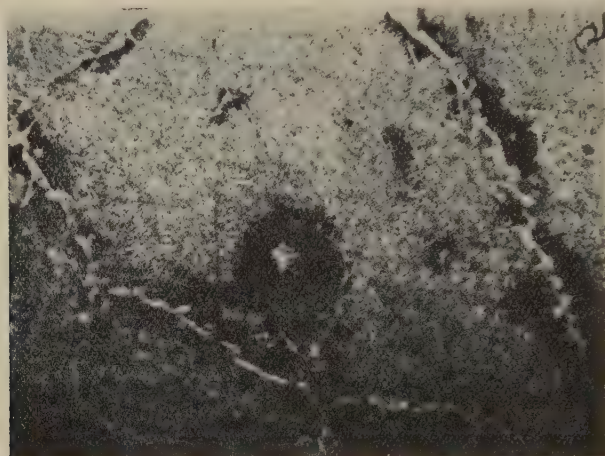


Fig. 41

d'un excès d'acétylène (figure 41). Ce grossissement du grain et son orientation expliquent les anomalies des résultats obtenus dans la liaison tôle-soudure avec les éprouvettes 3 et 4 du tableau 40.

Limite apparente d'élasticité. — Elle est supérieure à celle de la tôle pour le débit de 1.500 litres. Elle lui est inférieure d'environ 15 % pour le débit de 2.000 litres. Il y aura lieu de rechercher une amélioration de cette caractéristique.

Le dérèglage de la flamme continue à produire des effets nocifs. Les valeurs de R et de E sont si faibles que nous ne nous occuperons plus des résultats obtenus avec les éprouvettes 3 et 4.

Allongement. — L'allongement obtenu avec la première éprouvette correspond à ce qui est demandé dans la pratique à des soudures de bonne qualité.

Il est à remarquer que l'augmentation du débit améliore sensiblement l'allongement et lui donne une valeur comparable à celle des meilleures soudures effectuées par d'autres procédés, comme nous pourrions le voir par la suite.

Striction. — La striction du métal coulé est beaucoup plus faible que celle du métal laminé, ce que nous pouvions prévoir.

Résilience. — La résilience la plus élevée est encore inacceptable. Elle a sa valeur minimum dans la première éprouvette. Elle correspond à une disparition presque complète

du manganèse dans le métal fondu, disparition due à l'action prolongée du chalumeau, la soudure ayant duré 32' au lieu de 24'.

Si nous nous reportons aux chiffres du Cahier des Charges Unifié, que nous avons rappelés, nous voyons en outre que pour des valeurs de la résilience, de l'ordre de celles que nous avons trouvées avec un chalumeau de 2.000 litres, bien réglé, on est en présence de chiffres erratiques et qui ne peuvent réellement donner aucune certitude.

Influence de l'épuration de l'acétylène sur la composition finale du métal d'apport

Nous avons eu, avec la 5^e éprouvette, les résultats d'analyse suivants, comparés à ceux de la tôle et du métal d'apport, pour les teneurs en phosphore et en soufre.

Teneurs en phosphore et en soufre

	P	S
Tôle	0,04	0,019
Métal d'apport	0,026	0,033
Soudure	0,057	0,03

L'absence d'épuration qui laisse subsister, dans l'acétylène, des traces d'hydrogène phosphoré et d'hydrogène sulfuré, se traduit par une augmentation très sensible de la teneur en phosphore du métal fondu.

Quant au soufre, au lieu de diminuer comme dans toutes les autres éprouvettes, sa teneur est restée stationnaire, ce qui implique qu'une nouvelle quantité lui en a été fournie par l'acétylène.

L'épuration chimique est donc nécessaire, et nous la pratiquerons dans tous nos essais ultérieurs de soudure au chalumeau.

Influence de la soudure oxyacétylénique sur les caractéristiques mécaniques des tôles soudées

Toutes les caractéristiques mécaniques des tôles ont été changées.

Les principales modifications intervenues sont résumées ci-dessous :

	Moyennes				
	R	E	A ₁	A ₂	ρ
Tôle	36,8	23,6	36,5	31	13,89
Tôle au voisinage de la soudure	44,64	31,46	28,32	20,56	10,3
A 100 $\frac{m}{m}$ de la soudure	44,88	31,2	29,32	21,5	10

Si les contractions que nous avons observées, comme l'avait fait avant nous M. HÖHN, mais d'une manière un peu différente de la nôtre, n'avaient pas produit un écoulement du métal sur une grande étendue, nous aurions eu des résultats très différents.

Nous serions passés insensiblement, d'une faible zone de surchauffe, à une zone de recuit, puis à une zone de revenu. Or, le recuit et le revenu augmentent la résilience, tandis que l'écrouissage la diminue.

L'écrouissage longitudinal augmente la résistance et la limite élastique et diminue l'allongement. C'est ainsi qu'un acier ayant comme caractéristiques à l'état recuit

$$R = 42 \quad E = 28 \quad A \% = 26$$

aura, après un écoulement faisant passer une barre ronde de 20 mm. de diamètre à 18 mm. :

$$R = 65 \quad E = 60 \quad A \% = 12$$

On se trouve donc en présence de phénomènes complexes dans lesquels l'écrouissage est prépondérant.

Cet écoulement n'est pas dangereux, la résilience gardant une valeur élevée. Il est loin d'atteindre celui qui est déterminé dans une tôle par un cisailage ou un poinçonnage. Ces deux opérations sont susceptibles, comme l'a indiqué M. GALIBOURG, de donner naissance à des déchirures brusques partant du bord poinçonné ou cisailé. C'est là un phénomène bien connu des soudeurs autogènes, qui ont eu l'occasion de réparer des chaudières. Les cassures partant des trous de rivets sont extrêmement nombreuses.

Il pourrait s'en produire en soudure à la suite d'une chauffe locale prolongée inutilement, ou, dans le cas d'une soudure à l'arc, avec un débit trop élevé appliqué à l'électrode.

En se reportant aux chiffres du tableau 31 bis, confirmés par ceux du tableau 39 bis, on peut établir la courbe de résistance d'un assemblage soudé, sous des efforts statiques, la soudure ne présentant pas de surépaisseur.

On remarquera que, pour la résistance propre de la soudure, il existe une différence de 10 % entre la valeur de R sur métal entièrement coulé et sur assemblage soudé.

L'éprouvette est homogène dans le premier cas. L'effort se répartit dans toute sa masse. Le glissement des grains avant rupture n'est pas limité à un faible volume.

Il n'en est pas de même dans le deuxième cas, où l'éprouvette est complètement hétérogène.

La limite élastique élevée de la tôle, au voisinage de la soudure, ne lui permet de subir aucune déformation permanente. C'est le métal fondu qui supporte toute la charge.

Ceci est fort important, car ce phénomène conditionne le calcul des soudures.

Il conviendra donc de prendre les chiffres du tableau 40 pour la valeur de R dans la soudure. R augmente d'ailleurs, à cet endroit, en fonction de la quantité de métal sain, qui intervient dans une section droite, à cause de l'inclinaison du chanfrein. La courbe obtenue est donnée par la figure 42.

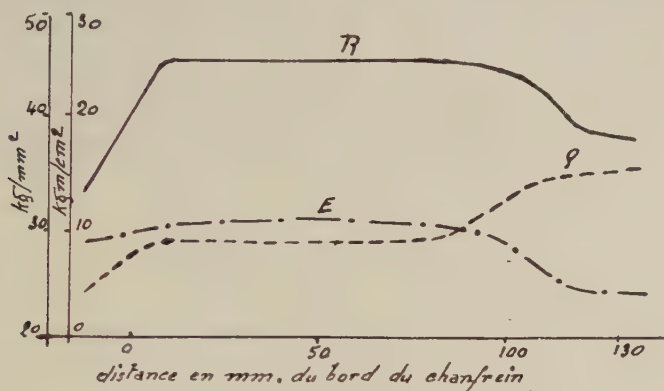


Fig. 42

Nous l'avons complétée par les variations de E et de ρ .

On voit que pour résister d'une façon satisfaisante à un effort statique, il suffira d'augmenter l'épaisseur de la soudure. Une augmentation de 10 % suffira, si l'on veut s'en tenir à la résistance de la tôle à l'état recuit. Il faudra aller jusqu'à 35 % si l'on tient compte de l'écrouissage.

Il est intéressant de noter la valeur de E qui, même sans surépaisseur, est supérieure à celle de la tôle non écrouie.

Amélioration de la résilience

Les efforts statiques ne sont pas les seuls qui interviennent dans beaucoup de constructions. Elles sont souvent soumises à une discontinuité des efforts pour laquelle la valeur de la résilience devient une condition très importante.

Il nous faut donc chercher une amélioration de la résilience, mais comme nous l'avons dit, nous ne voulons la trouver ni dans une reprise de la soudure, ni dans le remplissage du chanfrein par passes successives puisque, en soudure oxyacétylénique, les passes superposées constituent un mode opératoire exceptionnel.

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées :

- a) recuit général des pièces soudées;
- b) recuit localisé des soudures;
- c) recuit localisé et martelage des soudures;

- d) emploi de métaux d'apport de composition spéciale.
 e) emploi de métal d'apport en acier à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage.

Recuit général des pièces soudées

Le recuit général des pièces soudées présente l'avantage de faire disparaître l'écaillage. Il supprime toutes les tensions.

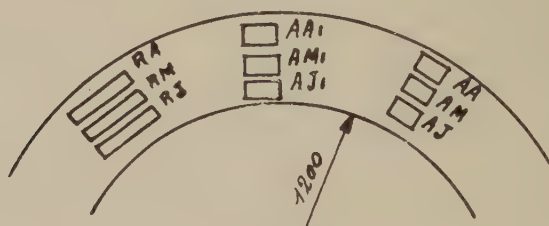


Fig. 43

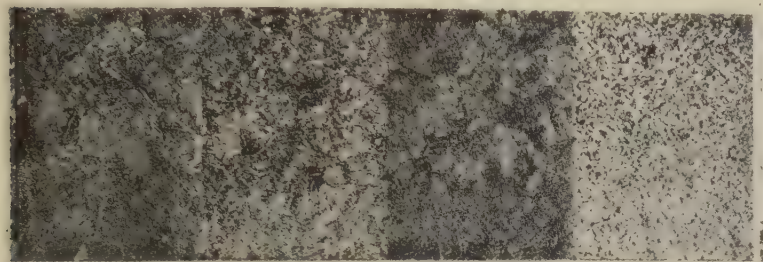
Il est intéressant de noter à ce sujet que la préparation mécanique des pièces à souder introduit souvent des tensions dont on ne tient pas assez compte. Le roulage d'une tôle plane pour en faire un cylindre en est un exemple. M. R. SULZER a fait, à ce sujet, des mesures qu'il est utile de rappeler.

Une tôle de 30 mm. d'épaisseur ayant été cintrée sur un rayon de 1 m. 200, deux séries d'éprouvettes en long et une série d'éprouvettes en travers ont été prélevées, comme l'indique la figure 43. Une seule série d'éprouvettes en long a été recuite. Le tableau 44 donne les résultats suivants pour la résistance à la traction, la limite apparente d'élasticité et l'allongement sur 50 mm.

TABEAU 44

Repères	R	E	A % 50 $\frac{m}{m}$	Observations
AA	42,5	34	26	Eprouvettes recuites
AM	42	25,27	31	
AJ	40,8	31,82	27	
RA	42	39	27	
RM	37	22,5	43	
RJ	42	40,5	23	
AA ₁	40	25,5	41	
AM ₁	41	25	40	
AJ ₁	39	24,8	44	

Bien que la forme et la dimension des éprouvettes n'aient pas été indiquées, les chiffres obtenus conservent leur valeur relative.



Métal
soudé

Recuit à 650°
refroidi
lentement

Recuit à 750°
refroidi
lentement

Recuit à 850°
refroidi
à l'air

Le roulage d'une tôle n'est d'ailleurs pas la seule opération qui puisse modifier ses caractéristiques mécaniques. Toutes les opérations de chaudronnerie, même un simple planage produisent, plus ou moins accentués, des effets analogues.

Nous en concluons que toutes les pièces soudées devraient être recuites, mais cette opération n'est pas toujours possible.

En ce qui concerne l'amélioration de la résilience des soudures au chalumeau, l'influence du recuit généralisé est considérable, à la condition que le recuit soit fait à 850°, qu'il dure au moins une heure et qu'il soit suivi d'un refroidissement à l'air. La résilience est alors multipliée par 5 ou 6. Nous avons fait passer la résilience d'une soudure de 0,915 kgs/cm² à 7,7 kgs/cm² en opérant de cette façon.

A température plus basse, avec un refroidissement lent, les résultats ne sont pas bons, comme l'indique la figure 45.

Recuit localisé

Le recuit peut être localisé aux lignes de soudure en se servant d'un chalumeau, par exemple, pour porter le métal au rouge.

Les résultats obtenus sont alors influencés par un très grand nombre de variables : puissance du chalumeau par rapport à l'épaisseur des tôles, distance de l'extrémité du dard à la surface de la tôle, vitesse d'avancement du chalumeau.

La lumière peut déterminer, par ses variations, des erreurs importantes dans l'appréciation de la température. Il faudrait pouvoir se servir d'un pyromètre, ce qui est presque impossible.

Ces circonstances nous ont conduit à éliminer des résul-

tats particulièrement favorables obtenus dans certains essais, mais que nous n'avons pas pu reproduire systématiquement, faute d'observations assez précises, que nous n'avions pas le moyen de faire.

Nous considérons que l'on peut admettre qu'un recuit localisé double la résilience, à la condition qu'il ait duré au moins 15 minutes et que la ligne chauffée ait été portée au rouge. La valeur de ρ est alors comprise entre 1,8 et 2,5 kgs/cm².

Recuit localisé et martelage des soudures

Le recuit localisé des soudures peut être complété par un martelage à chaud, si ce martelage est exécuté à coup portant et à une température supérieure au point de transformation du métal, c'est-à-dire au-dessus de 770° C.

Il ne faut donc pas marteler en-dessous du rouge cerise (800°) si l'on veut éviter la formation de criques.

Cette nécessité nous a conduit, depuis vingt ans environ, à supprimer le martelage à chaud dans la réparation des chaudières, à cause de la difficulté que l'on éprouve à surveiller la main-d'œuvre sur ce point particulier.

Le gain de résilience obtenu par un martelage à chaud est d'ailleurs insignifiant par rapport à un simple recuit localisé. Nous n'avons obtenu que de 1,88 à 2,65 kgs/cm², au lieu de 1,8 à 2,5 kgs/cm².

Emploi de métaux d'apport de composition spéciale

1° *Métal contenant un excès de manganèse.* — Avant de chercher à introduire dans le métal fondu des éléments n'existant pas dans la tôle à souder, nous emploierons un métal d'apport contenant un excès de manganèse, de nombreuses expériences nous ayant montré que ce corps paraissait avoir une influence capitale sur la résilience.

Nous avons vu, en effet, par les résultats d'analyse du tableau 39, que la plus faible résilience correspondait à la plus faible teneur en manganèse.

Le fil dont nous nous sommes servis avait une teneur en carbone très légèrement supérieure au précédent.

C = 0,10 au lieu de 0,077.

Mn = 0,84 au lieu de 0,286.

P = 0,015.

S = 0,020.

Si = 0,030.

Nous avons obtenu dans le métal fondu et dans la liaison tôle-soudure, les résultats mécaniques suivants :

TABLEAU 46

Métal fondu		Liaison tôle-soudure	Ces chiffres correspondent à des allongements mesurés à la fois sur le métal d'apport et sur la tôle.
R	35,6	37	
E	23	25,3	
A ₁	20	20	
A ₂	18	15	
A ₃	60	80	
A ₄	24,5	26	
ρ	2,25		

A l'analyse, nous avons trouvé :

$$\text{Mn} = 0,39$$

$$\text{C} = 0,05$$

L'augmentation de la résilience est suffisante pour supprimer le recuit localisé.

2° *Métal d'apport contenant un excès de manganèse et de carbone, en même temps que du nickel.* — L'excès de manganèse — dont une grande partie disparaît sous le chalumeau — ayant quand même donné des résultats encourageants, nous avons cherché à les améliorer encore par la présence de nickel, de chrome ou de cuivre.

On sait, en effet, qu'au delà d'une certaine limite, le manganèse fait reparaître la fragilité et qu'il y a lieu, en conséquence, de s'engager dans une autre voie, sans abandonner toutefois le manganèse, pour obtenir le résultat cherché.

Le nickel augmente la résistance et la limite élastique.

Le chrome augmente la résilience et lui conserve sa valeur, même avec un léger écrouissage, comme celui qui se produit dans la soudure et ses abords.

Le cuivre augmente la résistance.

Nous avons pris, tout d'abord, un métal contenant un excès de manganèse et du nickel, ainsi qu'une plus grande proportion de carbone, qui agit également sur la résistance dans la mesure où le chalumeau ne le fait pas disparaître.

$$\begin{aligned} \text{C} &= 0,23 \\ \text{Mn} &= 0,83 \\ \text{Ni} &= 0,54 \\ \text{P} &= 0,35 \\ \text{S} &= 0,071 \\ \text{Si} &= 0,37 \end{aligned}$$

Le soufre et surtout le phosphore s'y trouvaient en trop grande quantité. Nous en avons retrouvé l'influence dans

la diminution de l'allongement, malgré l'élimination partielle de ces deux éléments en cours de soudure.

Les résultats que nous avons obtenus sont cependant intéressants. Nous les avons rapprochés des caractéristiques mécaniques de la tôle au voisinage de la soudure.

TABLEAU 47
Caractéristiques mécaniques du métal

de la tôle au voisinage de la soudure		du métal fondu au chalumeau
R	= 44,64	48,5
E	= 31,46	33,6
A ₁	= 28,32	15
A ₂	= 20,56	13,8
ρ	= 10,3	5,6

Pratiquement, ces résultats sont bons. Cependant, l'excès de silicium, dont nous n'avons pas encore parlé, peut nuire pour l'exécution des soudures verticales et des soudures faites au-dessus de la tête du soudeur.

Le silicium augmente, en effet, la fluidité du métal fondu.

3° *Métal d'apport contenant un excès de manganèse et du carbone en même temps que du chrome.* — Le métal que nous avons choisi comme composition

C = 0,20
Mn = 1,40
Cr = 0,36
P = 0,03
S = 0,028
Si = 0,21

Nous sommes à la limite en ce qui concerne le manganèse. Le soufre et le phosphore sont à peu près inexistantes. L'allongement doit augmenter en même temps que la résistance, par suite de la présence du chrome. Nous avons eu :

R = 43
E = 34
A₁ = 21,7
A₂ = 19,4
ρ = 6,66

Toutes proportions gardées, l'observation précédente, en ce qui concerne le silicium, garde toute sa valeur.

4° Métal d'apport contenant un excès de manganèse en même temps que du chrome et de cuivre. — Nous avons essayé le métal suivant :

C	= 0,135
Mn	= 0,67
Cr	= 0,410
Cu	= 0,380
P	= 0,01
S	= 0,021
Si	= 0,160

Rapprochons encore les résultats donnés par ce fil d'apport des caractéristiques de la tôle aux abords de la soudure.

TABLEAU 48

Caractéristiques mécaniques

de la tôle au voisinage de la soudure	dans la soudure
R = 44,64	46,6
E = 31,46	34,5
A ₁ = 28,32	22,8
A ₂ = 20,56	18,6
ρ = 10,3	11,2

Dans les deux derniers essais, la rupture de l'assemblage tôle-soudure s'est produite dans la tôle.

Sur une longueur de 10 mm. environ, de chaque côté de la soudure et dans la soudure elle-même, on n'a constaté aucune réduction de section.

Des résultats analogues obtenus en soudure à l'arc — et sur lesquels nous reviendrons — nous amèneront à formuler une loi dont l'observation permettra de ne pas se préoccuper de la section soudée dans le calcul des soudures à franc-bord.

Les derniers chiffres que nous avons eus, montrent que l'on peut obtenir, en soudure au chalumeau, un assemblage absolument *homogène*, mais à ce moment-là, la soudure n'est plus, au sens strict du mot, une soudure autogène. Il faut s'en tenir, comme nous l'avons dit au début de ce travail, au sens général de ce terme.

Nous en arrivons ainsi à la véritable définition de la soudure autogène, qui est :

Un assemblage par fusion ayant les mêmes caractéristiques mécaniques que les métaux à réunir.

Avant d'aller plus loin et d'envisager l'emploi d'acier à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage, résu-

mons dans un tableau les résultats obtenus avec des métaux spéciaux.

TABLEAU 49

	Métal avec excès de Mn	Métal avec Ni et excès de Mn et de C	Métal avec Cr et excès de Mn et C	Métal avec Cu et Cr et excès de Mn
C	0,10	0,23	0,20	0,135
Mn	0,84	0,83	1,40	0,67
Ni		0,54		
Cr			0,36	0,410
Cu				0,380
R	35,6	48,5	43	46,6
E	23	33,6	34	34,5
A ₁	20	15	21,7	22,8
A ₂	18	13,8	19,4	18,6
ρ	2,25	5,6	6,66	11,2

Emploi d'un métal d'apport à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage

La découverte de KJELLBERG et le perfectionnement de ses enrobages nous ont amenés à penser qu'un acier à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage approprié, pouvait donner des résultats acceptables en soudure au chalumeau.



Fig. 50

Cependant le mécanisme d'action de l'enrobage n'est pas le même qu'avec la soudure à l'arc. Au chalumeau, l'enrobage est brûlé ou volatilisé sur une des faces de la baguette.

La figure 50 indique ce qui se passe.

Le tableau 49 nous évitera des tâtonnements dans l'emploi de fil enrobé.

1° *Métal d'apport à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage riche en manganèse.* — L'enrobage ne peut être que mince pour la commodité d'emploi du métal d'apport. Nous l'avons constitué par du ferro-manganèse finement broyé et du silicate de soude servant de liant.

Nous avons eu dans le métal fondu :

$$\begin{aligned} R &= 34,1 \\ E &= 22,9 \\ A^1 &= 15,7 \\ A^2 &= 14,1 \\ \rho &= 3,88 \end{aligned}$$

Nous avons des résultats comparables à ceux de la première colonne du tableau 49. L'allongement est plus faible, la résilience est meilleure.

2° *Métal d'apport à faible teneur en carbone recouvert d'un enrobage contenant du manganèse, du chrome et du cuivre.* — Il suffit de se reporter à la dernière colonne du tableau 49 pour avoir la composition de l'enrobage donnant les résultats cherchés. L'emploi de notre fil habituel évitera l'introduction de silicium.

Après divers essais, nous avons réussi à avoir les caractéristiques suivantes sur le métal fondu au chalumeau :

$$\begin{aligned} R &= 45,8 \\ E &= 33,7 \\ A^1 &= 20,5 \\ A^2 &= 18,1 \\ \varphi &= 9,65 \end{aligned}$$

CHAPITRE V

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOUDURES ÉLECTRIQUES A L'ARC RÉALISÉES SUR DES TOLES A FAIBLE TENEUR EN CARBONE. VARIATIONS DE COMPOSITION DES ENROBAGES

Conditions de réalisation des soudures

TÔLES

Les dimensions, la composition des tôles et leurs caractéristiques mécaniques resteront les mêmes que pour la soudure oxyacétylénique. Nous les rappelons ci-dessous :

$$\begin{aligned}R &= 36,8 \\E &= 23,6 \\A^1 &= 36,5 \\A^2 &= 31 \\A^3 &= 85 \\A^4 &= 40,5 \\ \Sigma &= 263,5 \\ \varphi &= 14,68\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C &= 0,034 \\Mn &= 0,418 \\P &= 0,04 \\S &= 0,019 \\Si &= 0,005\end{aligned}$$

MÉTAL DES ÉLECTRODES

Le métal des électrodes a été le même que le premier fil ayant servi à la soudure au chalumeau :

$$\begin{aligned}C &= 0,077 \\Mn &= 0,286 \\P &= 0,026 \\S &= 0,033 \\Si &= 0,009\end{aligned}$$

EXÉCUTION DES SOUDURES

Bien que le remplissage des chanfreins en plusieurs passes soit de règle en soudure à l'arc, il arrive cependant que l'on n'ait à faire qu'un dépôt de faible importance. C'est même un cas fréquent en chaudronnerie.

Il nous paraît donc nécessaire de faire deux sortes d'essais. Dans les premiers le chanfrein sera rempli d'un seul coup. Dans les seconds, on suivra les errements habituels, ce qui nous conduira à 4 passes de métal d'apport, et par conséquent à un recuit améliorant les qualités mécaniques de la soudure.

Les premiers essais, exactement comparables à ceux faits au chalumeau oxyacétylénique, nous permettront de mesurer la marge de sécurité de la soudure électrique à l'arc dans le cas le plus défavorable.

DIAMÈTRE DES ÉLECTRODES

Nous nous servirons uniquement d'électrodes de 4 mm. de diamètre. C'est le diamètre le plus employé. L'Arsenal de Brest, par exemple, ne le dépasse guère, même pour la soudure de tôles épaisses, comme on en rencontre à bord du cuirassé « *Dunkerque* », actuellement en construction dans ce port.

Le débit correspondant à ce diamètre, pour une électrode nue, est de 118,4 ampères d'après notre formule.

Si nous n'avions eu à faire que des soudures en une seule passe sur des tôles de 15 mm., nous aurions pris des électrodes d'un diamètre plus fort, pour gagner du temps, mais nos résultats n'auraient pas pu être comparés exactement.

TEMPS D'EXÉCUTION DES SOUDURES

Le temps d'exécution des soudures est la somme du temps de fusion des électrodes et des temps morts absorbés par l'enlèvement de la scorie et le changement des électrodes.

Le temps de fusion des électrodes est influencé par les facteurs suivants :

1° *Protection du métal en fusion.* — L'arc électrique produit deux sortes de phénomènes : fusion et volatilisation. Si l'électrode n'est pas protégée par un enrobage, les pertes par volatilisation sont assez fortes. Nous avons trouvé que le pourcentage de métal déposé au métal employé était de 0,821 % dans le cas de l'électrode nue, et de 0,914 % dans le cas d'une électrode enrobée.

2° *Intensité appliquée à l'électrode.* — La diminution de l'intensité augmente le temps de fusion. Elle a également d'autres inconvénients au point de vue de la soudure proprement dite. On peut avoir des collages du métal fondu au lieu de véritables soudures.

L'augmentation de l'intensité diminue le temps de fusion. Elle diminue aussi la quantité de métal déposé avec les électrodes nues, les phénomènes de volatilisation étant plus accentués. Avec les électrodes enrobées, l'augmentation de l'intensité correspond généralement à une diminution des qualités mécaniques de la soudure.

3° *Longueur des électrodes.* — Pour éviter toutes pertes de temps, l'électrode idéale devrait avoir une longueur indéfinie. La solution de ce problème est donnée par les machines automatiques à souder. Nous n'envisageons que le cas de la soudure manuelle et nous choisirons des électrodes de 450 mm. de longueur.

La partie utile de l'électrode, c'est-à-dire celle qui est fondue, n'a que 400 mm. de longueur. C'est cette longueur qui nous a servi à établir le pourcentage de métal déposé au métal employé. Les 50 mm. supplémentaires ne sont pas enrobés et servent uniquement à assurer un bon contact électrique entre l'électrode et la pince dans laquelle on la fixe.

En pratique, un ouvrier peut fondre à l'heure 15 électrodes. Il déposera donc, compte tenu de ce qui précède, 61 cm³ 91 en une heure; avec des électrodes nues, et 68 cm³ 91 avec des électrodes enrobées.

Le chanfrein de nos éprouvettes ayant un angle de 90°, il faudra 54 minutes pour le remplir avec des électrodes nues, et 48 minutes seulement avec des électrodes enrobées.

L'augmentation de durée par rapport au chalumeau tient uniquement au fait que pour celui-ci, nous nous sommes mis dans les conditions les plus favorables, qui étaient en même temps des conditions industrielles, alors que pour l'arc, nous avons envisagé le cas de l'électrode la plus employée. Tandis que pour la soudure oxyacétylénique, le débit du chalumeau supporte relativement peu de variation par rapport à l'épaisseur de la tôle, il n'en est pas de même pour l'électrode, qui a beaucoup plus de souplesse. La même électrode peut souder des tôles d'épaisseurs très différentes.

Influence de la soudure électrique sur les caractéristiques mécaniques des tôles soudées

Nous avons déjà montré, par les courbes de la figure 33, que l'arc était sans influence sensible sur les caractéristiques mécaniques des tôles soudées, et ceci nous a été confirmé par la mesure des températures que nous avons effectuée avec les différents procédés de soudure faisant l'objet de cette étude.

La résistance est très légèrement augmentée aux abords immédiats de la soudure; à 30 mm., elle a repris sa valeur normale, alors qu'au chalumeau, elle ne la reprend qu'à 110 mm. du bord du chanfrein.

Nous ne sommes pas allés aussi loin pour nos vérifications. Nous avons prélevé des barreaux d'essais contre le chanfrein et à 50 mm. de celui-ci au lieu de 110 mm.

Le tableau 51 résume les résultats obtenus avec une électrode nue et avec une électrode enrobée, en faisant une passe et ensuite quatre passes de métal d'apport.

TABLEAU 51

**Caractéristiques mécaniques de la tôle au voisinage
immédiat de la soudure et à 50 $\frac{m}{m}$ de celle-ci**

	Electrode nue				Electrode enrobée			
	au bord du chanfrein		à 50 $\frac{m}{m}$		au bord du chanfrein		à 50 $\frac{m}{m}$	
	1 passe	4 passes	1 passe	4 passes	1 passe	4 passes	1 passe	4 passes
R	37,9	38,2	36	36,8	37,2	38	36,1	36,5
E	25,9	26	24,6	23,9	26,0	26,0	24,3	24,9
A ₁	36,4	36,3	35,6	36	35,4	35,9	36	36,1
A ₂	30,8	29,5	29,0	30,8	30,1	30,9	31	30,5
A ₃	85	90	90	90	90	90	90	90
A ₄	39,9	41,8	39,6	40,7	40,2	42	41,5	39,8
ρ	15,2	14,3	14,8	14,5	14,3	14,8	14,4	14,7

Ces chiffres montrent que la soudure à l'arc n'a pas apporté de perturbations dans la tôle. Ils permettent de définir le problème à résoudre qui est d'obtenir une soudure ayant les mêmes caractéristiques que la tôle.

Nous partirons de l'électrode nue et nous la recouvrons ensuite de différents enrobages jusqu'à ce que nous ayons obtenu le résultat cherché.

1° Emploi de l'électrode nue.

Les éprouvettes ont été prélevées comme pour la sou-

dure oxyacétylénique. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé sont indiquées dans le tableau 52.

TABLEAU 52

Electrode nue — Débit 120 ampères
Caractéristiques mécaniques du métal déposé
en une passe et en quatre passes

	Une passe	4 passes
R	25,6	36,2
E	21,3	28,1
A ₁	1,4	7,8
A ₂	1,5	6
A ₃	2	30
A ₄	2	9
Σ	0	7
ρ	0,48	1,43

L'influence des passes répétées sur R, E et ρ est très sensible. Pour l'allongement, les améliorations obtenues ne conduisent pas à des résultats acceptables. Dans les deux cas, le métal déposé est rouverin. On ne peut pas le forger.

A titre documentaire, nous rapprocherons ces résultats de ceux du tableau 39, en les complétant par l'analyse du métal fondu à l'arc électrique.

TABLEAU 53

Résultats comparatifs de la Soudure au chalumeau
réalisée sans précautions spéciales
et de la Soudure à l'arc avec électrodes nues

	Chalumeau 1.500 lit.	Arc 1 passe	Chalumeau 2.000 lit.	Arc 4 passes
R	33,3	25,6	34,2	36,2
E	26,6	21,3	20,6	28,1
A ₁	13,5	1,4	23	7,8
A ₂	12	1,5	20	6
A ₃	30	2	50	30
A ₄	16	2	26	9
ρ	0,475	0,48	1,21	1,43
C	0,024	0,05	0,037	0,04
Mn	0,033	0,14	0,32	0,10
P	0,028	0,026	0,057	0,026
S	0,021	0,025	0,003	0,025
Si	0,000	0,000	0,000	0,000

La soudure oxyacétylénique, même exécutée dans de mauvaises conditions, est bien supérieure à la soudure électrique à l'arc avec électrodes nues, en une seule passe.

Seules les résiliences ont la même valeur, d'ailleurs insignifiante. Il en est de même pour la soudure à l'arc en 4 passes, si on la compare à la soudure au chalumeau correctement faite. L'amélioration de la résilience est du même ordre pour chaque procédé, sans toutefois être acceptable.

L'analyse du métal fondu montre que le carbone et le manganèse ont partiellement disparu.

Enfin, si l'on réalise une microphotographie à fort grossissement (500 diamètres), on trouve dans la soudure, la présence d'azotures qui sont la conséquence du contact du métal en fusion et de l'air. Ce contact est bien plus intime qu'au chalumeau, à cause du processus de fusion dans l'arc électrique (figure 55).

Il est intéressant de rapprocher nos chiffres de ceux obtenus par M. HODGE aux Etats-Unis, sur des soudures plus épaisses (figure 54). Il faudra tenir compte de ce que les essais américains ont été effectués sur des barreaux CHARPY alors que nous continuons à employer systématiquement les barreaux MESNAGER parce qu'ils donnent des résultats moins erratiques.

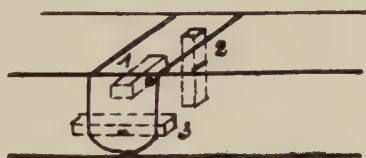


Fig. 54

Valeur des résiliences Charpy

Type d'électrodes	1	2	3
Electrode nue	0,14	0,28	0,42
	0,14	»	0,21
	0,82	0,7	1,4
	0,95	»	1,26
	0,91	»	2,1
Electrode enrobée	2,52	2,52	3,5
	4,62	3,72	4,34
	3,5	3,5	2,8
Arc au charbon dans une atmosphère réductrice	1,82	2,1	3,02
Arc métallique dans une atmosphère d'H ² ..	4,0	4,62	4,90
maximum	3,64	5,88	5,18
Tôle minimum		2,66	
		4,62	



Fig. 55

A titre documentaire, nous donnerons, parallèlement avec la soudure oxyacétylénique, les chiffres caractérisant la liaison tôle-soudure.

TABLEAU 56

Caractéristiques mécaniques de la liaison tôle-soudure

Au chalumeau		A l'arc, avec électrodes nues 1 passe
R.....	33,3	27
E.....	31,3	27

Nous poursuivrons nos essais en nous attachant d'une part à faire disparaître ces azotures, qui ont une influence considérable sur la fragilité à chaud, et d'autre part à reconstituer le manganèse par un enrobage approprié.

A priori, cet enrobage devra donc contenir de la silice, dont nous avons défini le rôle (protection du métal fondu contre l'action de l'air) et une quantité à déterminer de manganèse.

2° Emploi d'une électrode recouverte d'un enrobage composé de silice et de manganèse. — Nous nous étions déjà servis d'un enrobage analogue en soudure oxyacétylénique. Nous avons lié par du silicate de soude, du ferro-manganèse finement broyé.

Pour le cas qui nous occupe, il faut plus de silice. Nous avons fait un mélange à parties égales de ferro-manganèse et de silice. Le débit appliqué à l'électrode a été de 130 ampères.

Le tableau 57 donne les résultats obtenus.

TABLEAU 57
Electrode recouverte d'un enrobage Si-Mn

	1 passe	4 passes
R	39,6	45,3
E	23,3	31,6
A ₁	11,4	12,8
A ₂	8	10
A ₃	30	31
A ₄	13	14
ρ	0,62	8,66
Liaison tôle-soudure		
R	33,7	41,3
E	26,6	29,3
A ₁	8,6	20,0

(La mesure de l'allongement portant sur un métal laminé et sur un métal coulé est sans intérêt).

Avec une seule passe, R et E sont celles de la tôle. Il n'en est pas de même de l'allongement, ni surtout de la résilience. Les 3 recuits de la soudure ne l'amènent pas encore au chiffre dont nous avons besoin. Enfin ces recuits n'ont que peu d'influence sur l'allongement.

3° Emploi d'une électrode recouverte d'un enrobage basique.

L'analyse de la scorie du four Martin basique nous a fourni les éléments d'un enrobage. Nous avons observé les proportions de chaux, de silice, de manganèse, de magnésie et d'oxyde de fer qu'elle contient pour la composition de cet enrobage. Nous lui avons donné le maximum d'épaisseur compatible avec l'exécution de la soudure. Cette épaisseur nous a conduits, d'après notre formule, à un débit de 150 ampères.

TABLEAU 58
Electrode recouverte d'un enrobage basique

	1 passe	4 passes
R	32,9	50,8
E	21	32,9
A ₁	6,4	18
A ₂	3	15
A ₃	30	60
A ₄	7	20
ρ	1,26	8,96

Liaison tôle-soudure

	1 passe	4 passes
R	38,2	38
E	27,7	29,3
A ₁	13	10,8
A ₂	11,2	9,4

On observe une légère augmentation de la résilience avec une passe de métal d'apport. L'allongement, inférieur au précédent avec une seule passe, devient meilleur avec 4 passes. L'assemblage reste hétérogène.

4° *Emploi d'une électrode recouverte d'un enrobage acide.*

La scorie acide est caractérisée par une grande quantité de silice, ainsi que par une augmentation de l'oxyde de fer. La chaux a pratiquement disparu. Le débit correspondant à l'épaisseur de l'enrobage a été de 140 ampères.

TABLEAU 59

Electrode recouverte d'un enrobage acide

	1 passe	4 passes
R	30,5	35,3
E	21,3	23,4
A ₁	8,6	15
A ₂	5	12
A ₃	30	50
A ₄	11	15
ρ	2,99	5,7

Liaison tôle-soudure

R	33	38,5
E	27,3	27
A ₁	7,8	15
A ₂	5,1	12,3

La soudure en une seule passe reste toujours de qualité inférieure. Les résultats en 4 passes sont inférieurs aux précédents, cependant la résistance et la limite élastique correspondent à la tôle elle-même.

5° *Emploi d'une électrode recouverte d'un enrobage cellulosique.*

Un enrobage cellulosique est constitué essentiellement par des matières telles que le coton, le papier ou la sciure de bois. Il contient également du manganèse. Les premiers ont été étudiés par la *General Electric Company* à Schenectady (U.S.A.) et les seconds par la *E. O. Smith Corporation* à Milwaukee (U.S.A.). Ils donnent des résultats du même ordre et présentent l'avantage que la scorie dé-

posée sur le métal d'apport s'enlève très facilement. On peut même faire plusieurs passes sans l'enlever. Réchauffée, elle surnage toujours le métal en fusion.

Nous avons indiqué que la tension aux bornes d'un arc dans une atmosphère d'hydrogène, augmentait sensiblement. Un enrobage volatil, tel que celui dont nous nous sommes servis, conduit à une tension de 38 volts. Dans ces conditions on peut réduire le débit, le produit volts-ampères restant sensiblement constant, et l'augmentation du débit n'étant nécessitée que par l'augmentation des épaisseurs d'enrobages acides ou basiques. Nous avons adopté 110 ampères.

TABLEAU 60

Electrode recouverte d'un enrobage cellulosique

	1 passe	4 passes
R	35,8	44,9
E	27	30,4
A ₁	5,7	28,5
A ₂	3	25
A ₃	30	130
A ₄	6	33
ρ	19,7	19,1

Liaison tôle-soudure

R	34,9	41,2
E	22,6	29,3
A ₁	11	23
A ₂	8,7	20,1

La résilience obtenue avec une seule passe est tout à fait remarquable. Les recuits successifs ne l'améliorent pas. Elle reste toujours supérieure à celle de la tôle et marque une absence complète de fragilité dans la soudure.

Si l'apport de métal en 4 passes constitue une solution du problème parce qu'elle donne avec la tôle une soudure homogène, il n'en reste pas moins qu'avec une seule passe, nous avons toujours des allongements extrêmement faibles.

Nous avons obtenu un maximum de 11,4 % au cours de nos essais. Encore ce chiffre n'a-t-il subi aucune amélioration véritable par le recuit.

Notre opinion est que cette faiblesse de l'allongement est due à la vitesse de refroidissement du métal fondu qui est bien plus élevée que dans le cas de la soudure au chalumeau, où le métal est toujours réchauffé par le panache qui entoure le dard oxyacétylénique. Nous en trouvons une preuve dans le fait que l'amélioration minimum de l'allongement correspond à l'enrobage le plus mince et par suite le moins calorifuge dont nous avons fait usage.

Influence du débit en ampères appliqué aux électrodes sur les caractéristiques mécaniques du métal déposé.

Les débits à appliquer aux électrodes suivant notre formule ne peuvent être diminués sans que l'on risque du collage, comme nous l'avons indiqué.

Leur augmentation peut sembler, à priori, avantageuse soit pour que la liaison semble mieux assurée, soit parce que l'on réalise un gain de temps. Il importe de vérifier si ces améliorations ne sont pas obtenues aux dépens des caractéristiques mécaniques de la soudure.

Nous avons augmenté de 40 % l'intensité pour le cas des enrobages basiques et des enrobages cellulotiques dans le cas de la soudure à 4 passes qui est celle donnant les meilleurs résultats.

TABLEAU 61

**Influence d'une augmentation de débit de 40 0/0
sur les caractéristiques mécaniques de la soudure
en quatre passes**

Enrobage basique			Enrobage cellulotique		
Débit normal		Débit + 40 %	Débit normal		Débit + 40 %
R	50,8	54,5	44,9		43
E	32,9	33,6	30,4		26,4
A ₁	18	14,3	28,5		25,6
A ₂	15	12	25		20
A ₃	60	40	130		110
A ₄	20	16	33		31
ρ	8,96	5,08	19,1		19,1

Liaison tôle-soudure

R	38	29	41,2	40,8
E	29,3	26,6	29,3	27,7
A ₁	13	10,8	23	20

Ces résultats indiquent que l'augmentation de débit a bien plus d'influence sur les enrobages basiques que sur les enrobages cellulotiques. Ils paraissent à première vue contradictoires.

A la réflexion, on trouve qu'il n'en est rien.

Avec les enrobages basiques, la scorie se forme toujours à la même température, et l'excès de chaleur apporté par l'augmentation du débit se répartit dans le métal fondu et dans la tôle. Il se produit un écrouissage qui augmente la résistance et la limite élastique, et diminue l'allongement et la résilience.

Dans une éprouvette prise à 50 mm. du bord du chanfrein, dans la tôle, on ne trouve plus trace d'écrouissage.

André Le Chatelier avait signalé en 1919 la possibilité de déterminer à l'avance le degré de fusibilité d'un enrobage composé essentiellement de silice, d'oxyde de fer et de chaux. Il avait trouvé 1200° C.

Avec les enrobages cellulósiques, l'excès de chaleur libère et consomme une plus grande quantité d'hydrogène. Une partie du manganèse disparaît. Cette disparition est sans influence sur la résilience car elle est compensée par le recuit produit par l'élévation de température de dissociation de l'enrobage. La limite élastique et l'allongement sont légèrement diminués.

Amélioration des caractéristiques mécaniques du métal fondu en une seule passe à débit normal.

Deux systèmes peuvent être envisagés pour obtenir dans la soudure à une seule passe les caractéristiques mécaniques de la tôle : ou bien une modification de l'enrobage, ou bien une modification de l'âme de l'électrode.

Modification de l'enrobage

Les enrobages que nous avons employés présentent tous le même défaut qui est le manque d'allongement du métal fondu. La résilience est également mauvaise, sauf pour l'enrobage cellulósique.

Enfin, l'enrobage acide ne paraît pas susceptible d'amélioration, puisque même avec 4 passes, les valeurs de R et de E sont encore légèrement inférieures à celles de la tôle.

Nous avons repris l'enrobage Si - Mn et l'enrobage basique, et nous les avons combinés à poids égal avec l'enrobage cellulósique, de façon à obtenir au moins une meilleure résilience.

L'épaisseur d'enrobage que nous avons réalisée correspondait à un débit de 140 ampères d'après notre formule. Nous l'avons réduit à 130 ampères pour tenir compte de l'augmentation de tension aux bornes de l'arc due à la présence de l'hydrogène.

Nous avons eu :

TABEAU 62

Enrobage Si-Mn Cellulosique		Enrobage Basique Cellulosique	
R	41,3	R	40,2
E	29	E	28,6
A ₁	14	A ₁	22,1
A ₂	12,7	A ₂	20,3
ρ	12,07	ρ	12,72

La formule basique-cellulosique nous conduit à une soudure homogène analogue à celle que nous avons trouvée pour la soudure au chalumeau.

Reproduisons, à titre de comparaison, les caractéristiques de la tôle et de la soudure au chalumeau, et de la tôle et de la soudure à l'arc avec cette dernière solution.

TABEAU 63

Caractéristiques mécaniques

Soudure au chalumeau		Soudure à l'arc	
de la tôle	de la soudure	de la tôle	de la soudure
R	44,64	46,6	37,2
E	31,46	34,5	26,0
A ₁	28,32	22,8	35,4
A ₂	20,56	18,6	30,1
ρ	10,3	11,2	14,3
			12,72

Dans les deux cas les chiffres restent comparables.

Arc métallique dans une atmosphère d'hydrogène.

L'emploi d'une gaine gazeuse d'hydrogène autour d'un arc métallique, mis au point par Alexander aux Etats-Unis, donne des résultats intéressants, comme l'indique la figure 54. Cependant, nous ne retiendrons pas cette solution. L'arc est rageur et les soudures n'ont pas bel aspect. L'arc manque aussi de souplesse. Enfin, l'alimentation en hydrogène gazeux est plus compliquée que la production de l'hydrogène par l'enrobage.

Le procédé ALEXANDER n'a reçu que très peu d'applications industrielles.

Modification de l'âme de l'électrode

Le nickel nous ayant paru plus propre à combattre l'effet du refroidissement brusque de la soudure, nous avons pris l'acier suivant, que nous avons enrobé avec la formule cellulosique :

C = 0,23
Mn = 0,83
Ni = 0,54
P = 0,02
S = 0,02
Si = 0,15

Nous avons eu :

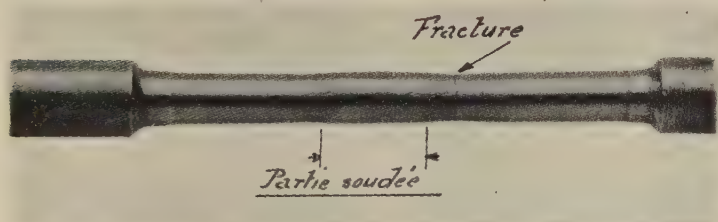
TABLEAU 64

**Caractéristiques mécaniques d'une soudure à l'arc
avec une électrode contenant du nickel**

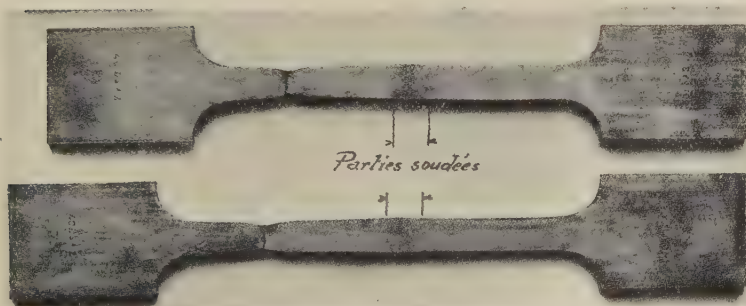
$$\begin{aligned} R &= 40 \\ E &= 29 \\ A_1 &= 17 \\ A_2 &= 15,2 \\ \rho &= 10,48 \end{aligned}$$

Cette solution, bien qu'intéressante, reste cependant inférieure à la précédente.

Nous ne la retiendrons pas, et nous ne ferons pas d'autres recherches dans une voie qui complique un problème que l'on peut résoudre plus facilement par le choix de l'enrobage à appliquer à des aciers à faible teneur en carbone.



Le diamètre de cette partie n'a pas diminué après traction jusqu'à la rupture.



La section des parties soudées n'a pas diminué après traction jusqu'à la rupture.

Fig. 65

Remarque au sujet des essais de traction

Au cours des essais qui précèdent, qu'ils aient été faits au chalumeau ou à l'arc, nous avons noté le fait suivant :

Dans un assemblage soudé soumis à un effort de traction pouvant aller jusqu'à la rupture, la soudure ne subit aucune déformation permanente si elle a une limite élastique supérieure à celle du métal soudé.

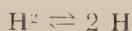
Cette remarque, importante au point de vue du choix du métal d'apport ou des électrodes, même dans le cas d'un assemblage hétérogène, est mise en évidence par les photographies de la figure 65, prises sur différents types d'éprouvettes. Elle simplifie le calcul des soudures pour les assemblages à franc-bord.

CHAPITRE VI

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOUDURES A L'HYDROGÈNE ATOMIQUE RÉALISÉES SUR DES TOLES A FAIBLE TENEUR EN CARBONE

Conditions de réalisation des soudures

Pratiquement, la soudure à l'hydrogène atomique semble un compromis entre la soudure à l'arc et la soudure au chalumeau. En réalité, c'est seulement l'arc qui intervient comme source de chaleur en décomposant l'hydrogène moléculaire en atomes. La reconstitution de la molécule sur la pièce à souder restitue la chaleur absorbée par la réaction :



Le métal soumis à une température de l'ordre de 4.000° se trouve fondu, tout en étant protégé contre l'action de l'air par l'hydrogène en excès qui brûle autour du papillon d'hydrogène atomique.

En règle générale, le chanfreinage des tôles, tout au moins pour l'épaisseur de 15 mm. que nous avons employée jusqu'ici, n'est plus nécessaire. Il suffit de placer les tôles bord à bord. La fusion est complète.

Nous sommes en présence d'une technique nouvelle, dans laquelle l'habileté de l'opérateur n'intervient plus.

Alors que précédemment, il fallait que celui-ci s'assurât que la liaison métal d'apport-tôle était bonne avec le chalumeau, et que la scorie ne restait pas mélangée avec le métal d'apport en soudure à l'arc avec électrode métallique, il n'a maintenant qu'à maintenir le papillon d'hydrogène atomique légèrement sécant à la surface des tôles. Là se borne son action.

Si des défauts, tels que des soufflures, par exemple, apparaissent à la surface du bain de fusion, elles ont leur ori-

gine dans le métal des tôles. On ne peut que constater leur présence. Le soudeur ne peut pas les faire disparaître.

La soudure à l'hydrogène atomique exige un métal convenablement élaboré et exempt d'impuretés. Cette propriété l'a fait employer à la vérification des tôles d'acier semi-inoxydables à faible teneur en carbone, dont on fait usage pour le revêtement des citernes à mazout.

Il n'existait pas, jusqu'ici, de règles pour l'exécution des soudures à l'hydrogène atomique. Nous avons essayé d'en tirer des résultats d'essais que nous avons pu contrôler.

Tous ces essais ont été faits en courant alternatif à cause de la nécessité où l'on se trouve d'avoir une usure égale des électrodes de tungstène. En courant continu, une des électrodes s'userait deux fois plus vite que l'autre.

1° La différence de potentiel aux bornes de la source de courant peut varier de 190 à 220 volts.

2° La fréquence peut varier sans inconvénients de 25 à 60 périodes.

3° L'énergie active est égale en Kva à l'épaisseur des tôles à souder en millimètres, la soudure étant faite en une seule fois.

4° Le facteur de puissance est de l'ordre de 0,5.

5° La dépense d'hydrogène est sensiblement :

$$H^2 = 0 \text{ m}^3 \text{ 6} + \frac{e}{15}$$

e étant l'épaisseur à souder en millimètres et le quotient étant évalué en mètres cubes.

6° La vitesse de soudure à plat, sans sujétion d'aucun ordre est :

$$V = \frac{60}{e}$$

V étant exprimé en mètres, e étant l'épaisseur à souder en millimètres.

7° La distance des électrodes à la pièce à souder peut varier de 7 à 10 mm.

Influence de la teneur en carbone des tôles et du calmage à l'élaboration du métal sur la soudure à l'hydrogène atomique

Il peut se produire, en fondant une tôle avec une torche à hydrogène atomique, des dégagements gazeux dans le métal, qui laissent, dans la zone de fusion, une série de trous.

On a constaté que ces dégagements n'avaient lieu ni sur

des tôles à faible teneur en carbone, ni sur des tôles carburées, calmées, au moment de la coulée, par l'adjonction de silicium ou d'aluminium.

Il semble que le dégagement de gaz à la solidification soit dû à une réaction entre le carbone et les oxydes. Les mêmes phénomènes se produisent au moment de la soudure que lors de la solidification du lingot. De là, la tendance à la formation de soufflures, accrue du fait de la solubilité de l'hydrogène dans le métal liquide.

La figure 66 représente la fusion sur champ d'une tôle carburée et non calmée. Les cratères sont plus nombreux dans la partie médiane correspondant à la région de ségrégation que sur les bords.

L'influence de l'aluminium a été mise en évidence par l'expérience suivante. Une tôle non calmée et formant des trous sous la flamme de la torche, a été saupoudrée d'aluminium. La fusion s'est produite aussitôt sans aucun défaut.

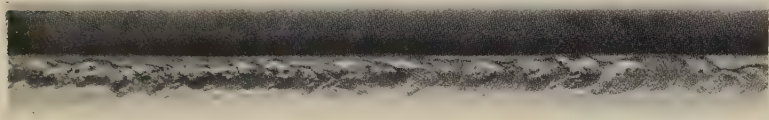


Fig. 66

Influence de la soudure à l'hydrogène atomique sur les caractéristiques du métal fondu et de la tôle au voisinage de la soudure

Nous nous sommes servis, comme précédemment, d'une tôle de 15 mm. d'épaisseur, les éprouvettes soudées ayant comme dimensions 250×125 .

La tôle avait les caractéristiques suivantes :

R	=	43,6
E	=	31,5
A ₁	=	28,5
A ₂	=	24
A ₄	=	32
ρ	=	13
C	=	0,063
Mn	=	0,565

La soudure a été faite sans chanfrein, les tôles étant placées bord à bord. On a obtenu les chiffres du tableau 67.

TABLEAU 67

Soudure à l'hydrogène atomique

	R	E	A ₁	A ₂	A ₄	ρ	C	Mn
Métal fondu	33,4	21,9	12,8	11	13	11,7	0,052	0,540
Zone recuite de la tôle	43,6	30,5	30,5	25	32	11,9	0,063	0,565

Il n'y a pas eu de transformation chimique appréciable; cependant, la résistance, la limite élastique et l'allongement ont fortement diminué.

Chimiquement, nous sommes en présence d'une véritable soudure autogène, la seule que nous ayons rencontrée jusqu'ici.

Le fait de souder sans métal d'apport pouvait permettre d'émettre cette hypothèse, sous réserve que l'hydrogène atomique soit sans action sur les composants de l'acier.

Mécaniquement, les anomalies que nous relevons dépassent la différence d'un métal laminé à un métal coulé, puisque la résilience est la même dans la zone de soudure que dans la zone de recuit.

Ce résultat nous ayant paru surprenant, nous l'avons vérifié en soumettant à l'action de la torche, jusqu'à fusion, une partie de la tôle avant soudure. Nous avons retrouvé les mêmes chiffres.

Nous pensons que la cause de ce phénomène est due à l'orientation et à la dimension des grains du métal.

Quoi qu'il en soit, il est nécessaire d'augmenter R, E et A. Nous avons déjà vu que pour R et E, l'addition de nickel était intéressante (pages 53 et 54).

Pour la réaliser, deux moyens s'offraient à nous. Le premier consistait à déposer un fil contenant du nickel sur la ligne de soudure, de façon à incorporer ce corps au métal fondu. Le second consistait à placer entre les bords des tôles une languette de métal contenant également du nickel.

Nous nous sommes servis du premier moyen.

Il nous fallait avoir dans le métal fondu une proportion suffisante de nickel. Nous avons donc pris un fil qui contenait :

Ni = 3 %.

C = 0,27.

Mn = 0,68.

Ce fil avait 4 mm. de diamètre

Les résultats ont été les suivants :

TABLEAU 68

**Soudure à l'hydrogène atomique avec métal d'apport
à 3 0/0 Ni**

R	E	A ₁	A ₂	ρ	Σ
41	29	20	20	11,7	22,5

Le métal fondu à l'hydrogène atomique a présenté la particularité intéressante d'avoir un allongement également réparti sur toute l'éprouvette. De ce fait A1 et A2 sont égaux et la striction n'atteint que le dixième de celle d'un métal laminé.

En remplaçant le fil à 3 % de nickel par une languette de métal de 3 mm. d'épaisseur et de 18 mm. environ de largeur — afin d'obtenir une légère surépaisseur de la soudure — on aurait pu se contenter du métal que nous avons déjà employé et que l'on trouve plus facilement que du fil à 3 % Ni. Ce métal avait la composition suivante :

Ni = 0,54.

C = 0,23.

Mn = 0,83.

Le problème de la soudure à l'hydrogène atomique nous paraît résolu, comme les précédents, par cet ultime essai.

Il est peut-être intéressant de résumer ce que nous avons obtenu dans les trois procédés que nous avons étudiés.

TABEAU 69

**Caractéristiques mécaniques des soudures autogènes
sur acier à faible teneur en carbone
et du métal soudé au voisinage de la soudure**

	Chalumeau		Arc électrique		Hydrogène atomique	
	Tôle	Soudure	Tôle	Soudure	Tôle	Soudure
R.....	41,64	46,6	37,2	40,2	43,6	41
E.....	31,46	34,5	26	28,6	30,5	29
A ₁	28,32	22,8	35,4	22,1	30,5	20
A ₂	20,56	18,6	30,1	20,3	25	20
ε.....	10,3	11,2	14,3	12,72	11,9	11,7

Avant de passer aux conclusions à tirer de ce travail, nous indiquerons, à titre purement documentaire et pour éviter à d'autres des recherches inutiles, les insuccès que nous avons rencontrés au cours de divers essais avec l'hydrogène atomique.

TABEAU 70

**Emploi d'une électrode à faible teneur en carbone
recouverte par un enrobage basique**

R	E	A ₁	A ₂	ε
41,3	25,8	17,2	15,8	6

TABLEAU 71

**Emploi d'un métal auxiliaire constitué par une électrode
à faible teneur en carbone
recouverte par un enrobage mi-basique, mi-cellulosique .**

<u>R</u>	<u>E</u>	<u>A₁</u>	<u>A₂</u>	<u>ρ</u>
36	23,4	11,4	9,7	0,5

L'hydrogène atomique est sans action sur le quartz. Il en est de même sur la silice, qui entre sous des formes diverses dans la composition de ce type d'enrobage.

TABLEAU 72

**Emploi d'un métal auxiliaire constitué par un fil nu
à faible teneur en carbone et à 13 0/0 de chrome**

<u>R</u>	<u>E</u>	<u>A₁</u>	<u>A₂</u>	<u>ρ</u>
32	27	4,3	3	12,3

La fusion est difficile. Le métal devient grumeleux. Ce métal d'apport est pratiquement inutilisable.

TABLEAU 73

**Emploi d'un métal auxiliaire constitué par un fil nu
à faible teneur en carbone
à 18 0/0 de chrome et 8 0/0 de nickel**

<u>R</u>	<u>E</u>	<u>A₁</u>	<u>A₂</u>	<u>ρ</u>
48	35	2,8	2	1,75

L'acier 18/8 se soude bien à l'hydrogène atomique. Cependant l'alliage chrome-nickel réagit mal sous la torche. L'allongement et la résilience disparaissent. Ce métal est d'ailleurs d'un prix trop élevé pour qu'on l'emploie pratiquement.

CHAPITRE VII

CONCLUSIONS

En entreprenant cette étude, qui n'a que la prétention de marquer un stade dans la technique de procédés en évolution constante, nous avons cherché à préciser :

1° les méthodes d'essais les plus propres à donner des résultats comparables;

2° les errements des usagers de la soudure autogène des métaux;

3° les moyens d'augmenter le coefficient de sécurité des assemblages par fusion pour le cas des aciers à faible teneur en carbone.

Méthodes d'essais

La diversité des cahiers des charges élaborés par les administrations françaises, pour le contrôle des soudures, est extrême. Il est rare que l'on applique aux mêmes objets les mêmes principes de contrôle. La dimension des éprouvettes varie sans raison apparente, et l'on mesure beaucoup plus souvent dans un assemblage soudé, l'allongement du métal laminé, plutôt que celui du métal coulé.

On attribue toutes sortes de vertus à des essais de pliage dont le moindre défaut est de donner des résultats erratiques avec des dispositifs semblables, suivant la façon dont on les conduit.

Et quand on s'en tient à la formule classique

$$L = \sqrt{66,67 S}$$

pour la mesure de la résistance, de la limite élastique, de l'allongement et de la striction, on trouve des variations,

toujours du même sens et qui sont fonction de la section des éprouvettes.

Nous pensons avoir apporté un peu d'ordre dans ce chaos en fixant une valeur et une forme constantes pour la section de l'éprouvette et en éliminant la striction dans la mesure de l'allongement.

Nous avons porté notre choix, pour la mesure de la résilience, sur le barreau MESNAGER. Il nous a paru indispensable de conserver la plus grande section possible à la partie qui reçoit le choc du marteau, de façon à réduire au minimum l'influence des petites imperfections que l'on peut toujours trouver dans un métal coulé n'ayant subi aucun traitement thermique complémentaire.

Errements des usagers de la soudure autogène des métaux

C'est une tendance universelle que de généraliser les bons résultats obtenus, même dans une seule expérience, pour en tirer argument en faveur du développement d'un procédé.

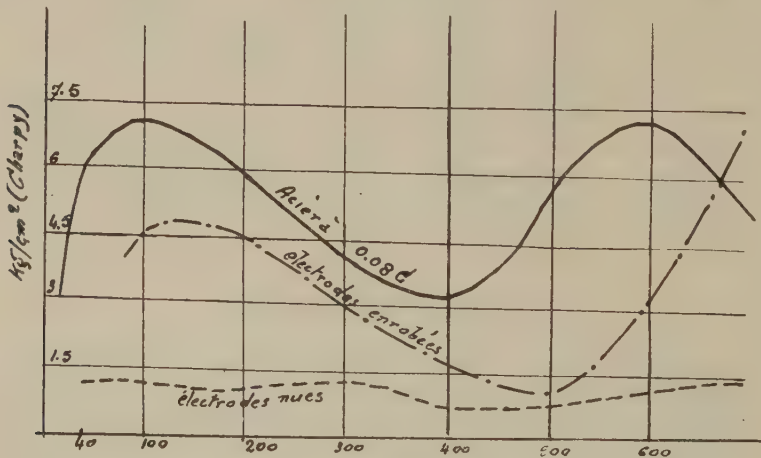


Fig. 74

On n'y a point manqué en soudure, qu'il s'agisse du chalumeau, de l'arc électrique ou de l'hydrogène atomique.

Les premiers succès d'André LE CHATELIER dans la réparation des chaudières marines — succès qui datent de 1906 — sont à la base du développement de l'emploi de la soudure oxyacétylénique dans toute l'industrie. L'audace et la réussite de ses réalisations donnèrent une confiance irraisonnée à des praticiens qui oublièrent les multiples précautions dont cet ingénieur s'était entouré avant de commencer ses travaux.

A. LE CHATELIER avait bien constaté la fragilité des soudures, mais il avait combattu cette fragilité par le recuit localisé et le martelage.

De plus, ses études antérieures lui avaient montré que la résilience des aciers extra-doux passait par un maximum à la température de fonctionnement des chaudières (figure 74).

Mais quand, au lieu d'une chaudière, on était en présence d'un réservoir en tôle mince, travaillant sous pression à la température ordinaire, et dans lequel les soudures, faites en une seule passe, n'étaient ni martelées ni recuites, les conditions devenaient très différentes.

Cependant, des essais hydrauliques, poussés jusqu'à la

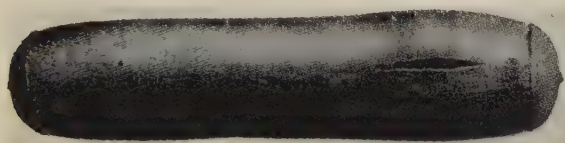


Fig. 75

rupture, sur de tels récipients, accrurent la confiance des praticiens de la soudure, parce que les résultats obtenus furent mal interprétés.

Les ruptures se produisirent en pleine tôle, assez loin des lignes de soudure. On en conclut à la haute qualité de celle-ci. Or, nous avons vu que la soudure au chalumeau produisait un écrouissage assez étendu et que cet écrouissage augmentait sensiblement la résistance et la limite élastique du métal.

En outre, les soudures étaient toujours surabondantes. Leur section, plus forte que celle de la tôle, compensait la faiblesse de la résistance. Il était donc logique que la rupture — sous un effort statique — se produisît en pleine tôle (fig. 75).

Il n'en eût pas été de même sous un effort dynamique.

Ceci explique les explosions survenues dans des réservoirs soumis à de multiples et très rapides variations de pression, comme les réservoirs à air comprimé alimentant des marteaux pneumatiques (fig. 76).

En soudure à l'arc, l'erreur fondamentale est la même. KJELLBERG avait débuté, comme A. LE CHATELIER, sur des chaudières marines. Toutes ses soudures étaient faites en plusieurs passes, ce qui améliorait sensiblement leur résilience.

Enfin, KJELLBERG conseillait de ne jamais entreprendre de soudure à l'arc sur des tôles d'épaisseur inférieure à 6 mm. comportant deux passes de métal d'apport.

Le souci de la sécurité, qui nous a toujours guidés, nous a amenés à formuler — en 1926 — des règles de l'art pour la construction et la réparation des chaudières et des réservoirs à pression. Elles furent accueillies sans enthousiasme, car beaucoup les considérèrent comme susceptibles d'entraver le développement de la soudure autogène. Cependant, la Commission Centrale des Machines à Vapeur, désirant



Fig. 76

codifier l'emploi de la soudure, les reproduisit entièrement dans l'arrêté qui fut soumis à la signature du Ministre des Travaux Publics, le 25 mars 1930, et dans les commentaires qui l'accompagnaient.

Quant à la soudure à l'hydrogène atomique, elle est d'un usage à la fois trop limité et trop récent pour avoir donné lieu aux mêmes errements que ses devancières.

Moyens d'augmenter le coefficient de sécurité des assemblages par fusion pour le cas des aciers à faible teneur en carbone

Les trois procédés de soudure que nous avons examinés nous ont conduits aux mêmes constatations quand on les a utilisés sans précautions spéciales.

On s'est toujours trouvé en présence d'une infériorité des caractéristiques du métal fondu par rapport au métal laminé. L'assemblage réalisé était essentiellement hétérogène.

Il importait de chercher un remède à ce défaut capital

et de trouver le moyen de réaliser, dans le cas le plus défavorable, un assemblage homogène.

Le problème se compliquait du fait que la soudure pouvait apporter des tensions dans les tôles. Nous les avons évaluées par des moyens simples et que l'on peut facilement reproduire.

L'obligation où nous étions de limiter nos recherches nous a amenés à choisir l'épaisseur des tôles servant à nos essais, de façon à pouvoir y prélever les éprouvettes donnant les résultats les plus constants. Notre méthode reste, cependant, générale. On peut la garder pour faire de nouvelles expériences sur des échantillons différents. L'objet essentiel de notre travail ne sera pas changé.

En soudure au chalumeau, nous avons indiqué deux moyens de résoudre le problème : métal d'apport spécial ou acier à faible teneur en carbone, convenablement enrobé. Il est facile de chercher d'autres solutions basées sur les mêmes principes.

En soudure à l'arc, l'enrobage auquel nous nous sommes arrêtés peut être remplacé par n'importe quel autre, équivalent.

En soudure à l'hydrogène atomique, nous avons formulé des règles d'emploi en même temps que nous cherchions l'amélioration de la résistance et de l'allongement.

La conclusion pratique à tirer de nos essais consisterait à modifier à la fois les règles de l'art en soudure autogène et les conditions d'épreuve des réservoirs soudés.

Nous souhaiterions que l'on imposât des caractéristiques mécaniques définies pour des soudures faites en une seule passe, et sans que l'on puisse les améliorer d'une façon quelconque.

Nous souhaiterions également que les essais hydrauliques des réservoirs destinés à subir des efforts dynamiques soient complétés par une brusque mise en surcharge, de façon à augmenter la sécurité des utilisateurs.

Enfin, les constatations que nous avons faites au sujet de l'absence de déformation de certains assemblages soumis à la traction permettent de ne pas tenir compte des soudures dans le calcul des joints à franc-bord si le métal d'apport est bien choisi.

La soudure à l'hydrogène atomique nous a permis de voir qu'une grande quantité de chaleur pouvait être apportée impunément sur une tôle à faible teneur en carbone, à la condition que la vitesse de soudure ait une valeur suffisamment élevée.

Ceci conduira probablement à l'emploi de chalumeaux très puissants et d'électrodes de grande section.

Le champ des possibilités reste ouvert dans cette voie à toutes les initiatives.

Maurice LEBRUN.

BIBLIOGRAPHIE

A

- L. H. AITCHISON. — *Metallurgical aspects of welding*. Acetylene Journal, août 1923.
- P. ALEXANDER. — *The electric arc and its function in the new welding processes*. Journal of american welding society, juillet 1927.
- P. ALEXANDER. — *Arc welding in hydrogen and other gases*. Journal of american welding society, mars 1926.
- C.-R. AUSTIN. — *Décarburation de l'acier par l'hydrogène*. Congrès de l'American Society for Steel Treating, Détroit, octobre 1933.
- Autogen Metallbeitung. — *Essai de résilience comme méthode d'examen*.

B

- BARBA. — *Commission des méthodes d'essai*. Volume 3, 1895.
- J. BARBANDY. — *L'hydrogène atomique*. Collaboration au traité de chimie générale de Pascal.
- A.-G. BISSEL. — *Arc welding in the airplane industry*. A paper presented at the maintenance — engineering conference U. S. Army Air Service at Mitchel Field, octobre 1925.
- H.-M. BOYLSTON, A. JENKIN et I.-C. CARPENTER. — *A metallographic study of some metallic arc welds*. Journal of american welding society, septembre 1927.
- Louis BRÉGUET. — *Les aciers au nickel-chrome auto-tremnants et la construction aéronautique*. Revue du Nickel, octobre 1933 (122).
- BRILLIÉ et MORLET. — *L'hydrogène atomique. Application à la soudure des métaux*. Revue de Métallurgie, décembre 1929-janvier 1930.

- BUREAU VÉRITAS. — *Règlement pour la construction des charpentes et des planchers métalliques.*
BUREAU VÉRITAS. — *Règlement pour la construction des navires par soudure électrique.*

C

- J. CALDWELL. — *Arc welding apparatus.* The welding Engineer, novembre-décembre 1923.
J. CALDWELL. — *Fluxes and their functions.* The Welding Engineer, février 1924.
CLARKE. — *L'oxycoupage de l'acier pour des joints à souder.* Welding Industry, novembre 1933 (315-320).
CONSIDÈRE. — *Commission des Méthodes d'essai*, 1892.

D

- J.-R. DAWSON. — *Cutting Steel.* Welding Engineer, juin 1923.
J.-R. DAWSON. — *Metallography and testings of oxy-acetylene welds.* Welding Engineer, octobre 1923.

E

- Effets de l'oxycoupage sur l'acier. Oxyacétylène Tips*, novembre 1933 (249-251).

G

- J. GALIBOURG. — *Revue de Métallurgie*, juin 1929.
J. GALIBOURG. — *Le nickel et les problèmes intéressant la construction navale.* Association technique Maritime et Aéronautique 1933.
H. GERBEAUX. — *Contribution à l'étude de la structure des aciers doux.* Congrès International de Soudure Autogène, Zurich 1930.
T. GODARD. — *La soudure dans les constructions métalliques.* Premier Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes, Paris 1932.
GRANJON et ROSEMBERG. — *Traité de soudure autogène et d'oxycoupage.*
Général GRARD et J. Cournot. — *Métaux et alliages.*
L. GUILLET. — *Les méthodes d'étude des alliages métalliques*, 1923.

H

- HERBY et C. CHRISTOPHER. — *Contrôle de l'oxyde de fer dans les fours Martin. Influence sur la viscosité des laitiers.* Metallurgical advisory Board, Pittsburg, octobre 1933.
J-C HODGE — *Résilience du métal soudé.* Journal of american welding society, janvier 1934.

- E. HOEHN. — 1915. *Essais de soudures autogènes de tôles de chaudières.*
E. HOEHN. — 1922. *Essais de soudures autogènes et électriques des pièces de chaudières.*
E. HOEHN. — 1924-1925. *Rivure et soudure des chaudières à vapeur.*
E. HOEHN. — 1928. *Résistance des récipients soudés à l'électricité.*

K

- L. KAPENCK et Dr J. FALTUS. — *L'Application de la Soudure Autogène aux constructions métalliques.* Premier Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes. Paris 1932.

L

- Irving LANGMUIR. — *Physical Review*, 1912.
Irving LANGMUIR. — *Journal american chemist Industry*, 1913-1916.
Irving LANGMUIR. — *Flammes d'hydrogène atomique.* General Electric Review, 1916.
Irving LANGMUIR. — *General electric Review*, 1922.
M. LEBRUN. — *La Soudure électrique à l'arc et ses applications.*
M. LEBRUN. — *Chaudières et réservoirs à pression.*
H. LE CHATELIER. — *Introduction à l'étude de la métallurgie.*
H. LE CHATELIER. — *La silice et les silicates.*
H. LE CHATELIER. — *Communication à l'Académie des Sciences. Combustion de l'acétylène et de l'oxygène.* Tome 121, page 1114, 1895.
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING. — *Règlement pour la construction des navires par soudure électrique.*

M

- L.-B. MACKENZIE. — *The welding encyclopedia*, Chicago, 1930.

O

- OSMOND. — *Mémorial de l'Artillerie de Marine*, 1887. XV, 573 (Courbes de refroidissement).

P

- Marcel PIETTE. — *Manuel de Soudure Autogène*, 1933.
Marcel PIETTE. — *Dilatation et retrait.* Bulletin de la Société des Ingénieurs Soudeurs.
P.-P. PIPES. — *Arc welding progress.* Welding Engineer, juillet 1923.

R

- RIBAUD et SEFERIAN. — *Sur l'étude des flammes aux hautes températures*. Revue de la Soudure Autogène, octobre 1933.
A.-T. ROBERTS. — *Some of the function of electrode coating*. Welding Engineer. Vol. VI. New series. 1933.

S

- SCHÜTZ et PRÜGEL. — *Tensions de retrait*. Stahl und Eisen, novembre 1933, pages 1233-38.
SCHWARTZ. — *Tensions internes dans les soudures*. Journal of american welding society, novembre 1933.
J. SEIGLE. — *Etudes récentes sur les aciers doux*. Technique Moderne. Tome XXVI, n° 1.
Shun-Ichi SATOH. — *Quelques études sur la soudure à l'arc électrique de la fonte avec électrodes métalliques*. Revue de Métallurgie, décembre 1929.
G. SIROVITCH. — *Proprieta resistenti della soldatura autogena on acciaio dolce*.
R. SULZER. — *Welding for pressure vessels*. The Institute of Marine engineers session 1933. Vol. XLV.

T

- F.-C. THOMPSON. — *Properties of steel in welding*. Welding Engineer, juillet 1924.
E.-E. THUNN. — *Selection of material for welding*. Journal of american welding society, mai 1927.

V

- E. VARRIOT. — *Etude sur les tensions internes dans les soudures*. Revue Technique des Arts et Métiers, janvier 1934.

W

- R.-A. WEINMANN and I. LANGMUIR. — *Arcs de soudure dans l'hydrogène atomique*. General Electric Review, mars 1926.
WÜRTZ. — Dictionnaire de Chimie.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS LUMINEUSES
ET LES VAPEURS NOCIVES

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 25 Février 1935

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
CH. MAURAIN.

VU

et Permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie de Paris,
CHARLÉTY.

